

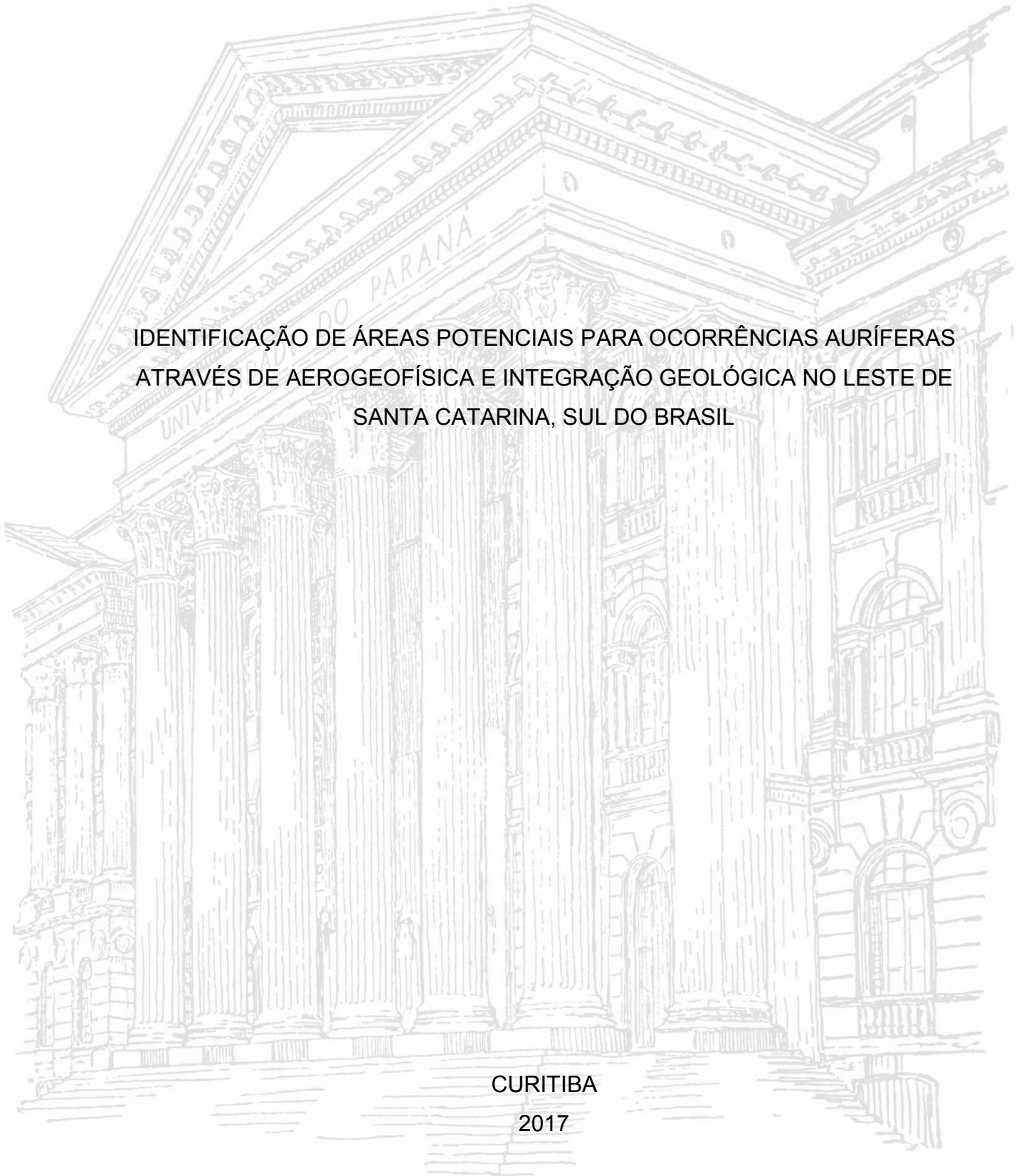
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO MACCHIONI PEREIRA

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS PARA OCORRÊNCIAS AURÍFERAS
ATRAVÉS DE AEROGEOFÍSICA E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA NO LESTE DE
SANTA CATARINA, SUL DO BRASIL

CURITIBA

2017



BRUNO MACCHIONI PEREIRA

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS PARA OCORRÊNCIAS AURÍFERAS
ATRAVÉS DE AEROGEOFÍSICA E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA NO LESTE DE
SANTA CATARINA, SUL DO BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da
Terra, Universidade Federal do Paraná, para obtenção
do grau de Mestre em Geologia

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

Coorientadores: Prof. Dr. Leonardo Fadel Cury

Dr. Luís Gustavo de Castro

CURITIBA

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

P436i

Pereira, Bruno Macchioni

Identificação de áreas potenciais para ocorrências auríferas através de aerogeofísica e integração geológica no leste de Santa Catarina, sul do Brasil / Bruno Macchioni Pereira. – Curitiba, 2017.
100 p. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2017.

Orientador: Francisco José Fonseca Ferreira.

Coorientadores: Leonardo Fadel Cury, Luís Gustavo de Castro.

1. Gamaespectrometria. 2. Magnetometria. 3. Exploração mineral. 4. Cinturão Dom Feliciano.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Ferreira, Francisco José Fonseca. III. Cury, Leonardo Fadel.
IV. Castro, Luís Gustavo de. V. Título.

CDD: 551.409816

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214

TERMO DE APROVAÇÃO

BRUNO MACCHIONI PEREIRA

“Identificação de áreas potenciais para ocorrências auríferas através de aerogeofísica e integração geológica no leste de Santa Catarina, sul do Brasil.”

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:



Prof. Dr. Neivaldo Araújo de Castro - UFSC



Prof. Dr. Pedro Filipe de Oliveira Cordeiro - UFPR



Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira – UFPR
Presidente

Curitiba, 28 de abril de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao Professor Dr. Francisco José Fonseca Ferreira, por sua paciência, compreensão, disponibilidade, disposição e pelas discussões, sugestões, auxílio e apoio.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio, carinho, incentivo, dedicação e preocupação.

À minha namorada Graciany, pela paciência (muita paciência), dedicação, companheirismo, disponibilidade e ajuda.

Aos colegas do LPGA, pela companhia e auxílio.

Aos colegas da Pós-Graduação: Leonardo Barão, Thammy Mottin, William Peyerl, Guilherme Fedalto, Tiago Casseb e Felipe Nadalin pelo auxílio, pelas discussões e parceria.

Aos professores do Departamento de Geologia, por sanar as dúvidas, pelas aulas e discussões.

Ao Programa de Pós-Graduação, pela celeridade na resolução dos problemas e prontidão em ajudar.

À CPRM, pelos dados cedidos do Projeto Aerogeofísico Paraná – Santa Catarina, fundamentais para este trabalho.

Aos amigos da CPRM – Núcleo Curitiba: Chieregati, Oderson, Vicente e Mara, pelo apoio e carinho.

Aos colegas da SPU Tocantins, pela compreensão e paciência durante esta etapa.

RESUMO

As regiões de Brusque e Botuverá, localizadas na porção leste do Estado de Santa Catarina, estão inseridas no contexto do contato entre os terrenos Luís Alves e Tijucas, definido pela Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó. As unidades litoestratigráficas que afloram na área de estudo são o Complexo Ribeirão da Prata, composto principalmente por migmatitos e gnaisses de idade paleoproterozoica, as unidades metavulcanossedimentares do Complexo Metamórfico Brusque, do Mesoproterozoico, as unidades sedimentares neoproterozoicas do Grupo Itajaí, os corpos graníticos das suítes Valsungana, Guabiruba e Nova Trento, de idade neoproterozoica, e as intrusões básicas e alcalinas do Cretáceo. Associadas aos corpos graníticos, ocorrem mineralizações em ouro caracterizadas por veios e filões de quartzo com sulfetos (pirita, calcopirita, galena) e óxidos de ferro, além da presença de teores de cobre e prata subordinados. Estas mineralizações estão em geral localizadas próximas a *stocks* graníticos periféricos às intrusões maiores, nas bordas dessas intrusões, em zonas de metamorfismo de contato e também em restos de teto. O fluido mineralizador que gerou essas ocorrências produziu também zonas de alteração hidrotermal, potássica e filica. Uma fase posterior de reativação de zonas de cisalhamento resultou em remobilização de fluidos e de sulfetos, modificando a geometria e composição das ocorrências. Com base nos dados geológicos das folhas Brusque, Botuverá, no Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina e nos dados gamaespectrométricos e magnetométricos de alta resolução espacial (linhas de voo espaçadas de 500 metros) obtidos do Projeto Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina, o trabalho apresenta resultados de correlação destes dados na área de estudo. Um dos objetivos do presente trabalho também foi estabelecer uma comparação entre este levantamento geofísico com o Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul, realizado na década de 70, também objeto de estudos de pesquisa mineral em Botuverá. A magnetometria foi principalmente empregada para a interpretação do arcabouço estrutural-magnético e a análise do controle estrutural das ocorrências minerais, enquanto que a gamaespectrometria auxiliou a interpretação dos litotipos, a identificação de zonas de alteração hidrotermal potássica associadas às mineralizações auríferas e, subordinadamente, à interpretação estrutural da área. Métodos de realce de anomalias magnéticas foram importantes para definir de forma mais precisa a localização dos centros e das bordas de estruturas ou de corpos magnéticos. Já os métodos gamaespectrométricos como o Parâmetro F, o Potássio Anômalo e o Urânio Anômalo foram usados para definir as assinaturas radiométricas de ocorrências auríferas já conhecidas na área, como as ocorrências do Morro do Carreiro Branco, Braço da Cristalina e Tigrano e o depósito do Cavalo Branco, e também definir anomalias de potássio e urânio que não sejam relacionadas a fatores ambientais, como o condicionamento geomorfológico e a formação de solos. A integração dos dados geológicos, estruturais, metalogenéticos e aerogeofísicos, através da construção de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e do método *knowledge-driven*, permitiu a elaboração de um mapa de favorabilidade para a ocorrência de zonas de alteração hidrotermal associadas a mineralizações de ouro. Os resultados obtidos revelam a importância da aplicação da aerogeofísica de alta resolução espacial na exploração mineral de ouro em ambientes geológicos similares.

Palavras-Chave: *Gamaespectrometria, Magnetometria, Exploração Mineral, Cinturão Dom Feliciano*

ABSTRACT

The regions of Brusque and Botuverá, located in the eastern portion of Santa Catarina State, are inserted in the context of the contact between the Luís Alves and Tijucas lands, defined by the Itajaí-Perimbó Shear Zone. The lithostratigraphic units that appear in the study area are the Ribeirão da Prata Complex, composed mainly of migmatites and gneisses from Paleoproterozoic, the Mesoproterozoic metavolcanosedimentary units of the Brusque Metamorphic Complex, the neoproterozoic sedimentary units of the Itajaí Group, the granite intrusions of Valsungana, Guabiruba and Nova Trento suites, of neoproterozoic age, and the basic and alkaline intrusions of the Cretaceous. Au mineralizations characterized by quartz-sulfides veins (pyrite, chalcopyrite, galena) and iron oxides, in addition to the presence of subordinate copper and silver contents occur associated with these granitic intrusions. These mineralizations are generally located close to granitic stocks peripheral to larger intrusions, at the edges of these intrusions, in zones of contact metamorphism and also in roof pendants. The mineralizing fluid that generated these mineralization also produced hydrothermal potassium and phyllic alteration zones. A subsequent phase of shear zones reactivation resulted in remobilization of fluids and sulfides, modifying the geometry and composition of the occurrences. Based on the geological data of the Brusque, Botuverá Sheets, in the Geological Map of the State of Santa Catarina and the gamma-spectrometric and magnetometric data of high spatial resolution (flight lines spaced 500 meters) obtained from the Paraná-Santa Catarina Aerogeophysical Project, this work presents correlation of these data in the study area. One of the objectives of this work was also to establish a comparison between this geophysical survey and the Serra do Mar Sul Aerogeophysical Project, flown in the 1970s, which was also the object of mineral research studies in Botuverá. The magnetometry was mainly used for the interpretation of the structural-magnetic framework and the analysis of the structural control of the mineral occurrences, while the gamma spectrometry aided in the lithologic interpretation, in the identification of potassium hydrothermal alteration zones associated to the auriferous mineralizations and, subordinately, in structural interpretation. Methods of enhancement of magnetic anomalies were important to define more precisely the location of the centers and the edges of structures or magnetic bodies. The gamma-spectrometric methods such as Parameter F, Anomalous Potassium and Anomalous Uranium were used to define the radiometric signatures of known Au occurrences, such as the Morro do Carneiro Branco, Braço Cristalino and Tigrano occurrences and the Cavalo Branco deposit, and also define potassium and uranium anomalies that are not related to environmental factors, such as geomorphological conditioning and soil formation. The integration of geological, structural, metallogenic and aerogeophysical data, through the construction of a Geographic Information System (GIS) and the use of knowledge-driven method, allowed the elaboration of a map of favorability for the occurrence of Au associated hydrothermal alteration zones. The results obtained reveal the importance of aerogeophysics of high spatial resolution application in Au mineral exploration in similar geological environments.

Keywords: *Gamma-spectrometry, Magnetometry, Mineral Exploration, Dom Feliciano Belt*

Lista de Figuras

Figura 1: Localização da área de estudo (em azul) e os principais acessos (em vermelho). ...	13
Figura 2: Fluxograma da pesquisa.	14
Figura 3: Janelas energéticas dos elementos radioativos. Extraído de Ribeiro et al. (2013). ...	16
Figura 4: Principais técnicas de processamento aplicadas aos dados gamaespectrométricos. ...	18
Figura 5: Métodos de realce de anomalias.	20
Figura 6: Processo de Redução ao Polo. Extraído de Isles & Rankin (2013).	21
Figura 7: Principais técnicas de processamento aplicadas à dados magnéticos.	24
Figura 8: Em azul, a localização do PPRSC, em vermelho, a área de estudo.	25
Figura 9: Contexto tectônico da porção nordeste do estado de Santa Catarina, em vermelho, a área de estudo. Adaptado de Basei et al. (2011b).	30
Figura 10: Seção Geológica do Terreno Tijucas e adjacências. Adaptado de Basei et al. 2011.	32
Figura 11: Mapa geológico da área de estudo. Adaptado de CPRM/USP, 2015.	33
Figura 12: Contexto geotectônico, com detalhe para as suítes graníticas. Adaptado de Hueck et al. 2016.	37
Figura 13: Coluna estratigráfica da Bacia do Itajaí. Adaptado de Basei et al. 2011 a.	39
Figura 14: Sistemas deposicionais e associações de fácies da Bacia do Itajaí. Adaptado de Costa & Nascimento (2015).	40
Figura 15: Geologia simplificada da área, com as principais ocorrências de ouro primário. (1) Carneiro Branco, (2) Fanuelsson, (3) Tigrano, (4) Ribeirão do Russo, (5) Braço da Cristalina. Adpatado de Caldasso et al. 1995.	43
Figura 16: Métodos magnéticos utilizados para a delimitação dos lineamentos.	45
Figura 17: Lineamentos magnéticos e sua distribuição na área de estudo. No canto superior esquerdo, os lineamentos de acordo com sua direção, no canto superior direito, os lineamentos NE e EW com as ocorrências (em amarelo); no inferior esquerdo, os lineamentos NE separados em zonas; no inferior direito, os lineamentos NW.	46
Figura 18: Mapas Magnéticos; (a) Campo Magnético Anômalo; (b) Redução ao Polo; (c) Gradiente Horizontal Total; (d) Amplitude do Sinal Analítico; (e) Inclinação do Sinal Analítico; (f) Signum Transform; (g) ISA-GHT; (h) GHT-ISA.	47
Figura 19: Mapas Gamaespectrométricos; (a) Contagem Total; (b) Potássio; (c) equivalente de Urânio; (d) equivalente de Tório; (e) Ud; (f) Kd; (g) Mapa Ternário K-eTh-eU; (h) Mapa Ternário PF-Kd-Ud e (i) Parâmetro F.	48
Figura 20: Determinação dos domínios gamaespectrométricos (figura inferior) a partir do mapa ternário (superior esquerdo) e Contagem Total (superior direito).	50
Figura 21: Correlação dos domínios gamaespectrométricos com geologia.	51
Figura 22: Lineamentos Gamaespectrométricos separados de acordo com o método.	52
Figura 23: Lineamentos gamaespectrométricos e sua relação com mineralizações auríferas.	53
Figura 24: Valores superiores a $x+S$ para Kd (verde), Ud (azul) e PF (vermelho), com indicação das rochas mineralizadas (em preto).	54
Figura 25: Mapa do Kd com lineamentos (em preto) e ocorrências auríferas (em branco) sobrepostos.	56
Figura 26: Mapa do Ud com lineamentos (em preto) e ocorrências auríferas (em branco) sobrepostos.	56
Figura 27: Mapa do PF com lineamentos (em preto) e ocorrências auríferas (em branco) sobrepostos.	57
Figura 28: Mapa dos métodos magnéticos e radiométricos, conforme sugerido por Irvine & Smith (1990).	58
Figura 29: Áreas com valores superiores a $x+S$ para Kd (verde), Ud (azul) e PF (vermelho), combinados aos lineamentos magnéticos NE (em preto) e ocorrências auríferas (branco).	59

Figura 30: Comparação entre as linhas de voo do PPRSC (esquerda) e do PSMS (direita).	Error! Bookmark not defined.
Figura 31: Comparação dos projetos PPRSC (esquerda) e PSMS (direita).Em preto, as áreas definidas por Fornazzari & Ferreira (2003)	Error! Bookmark not defined.
Figura 32: Comparação dos mapas do PPRSC (esquerda) e do PSMS (direita).	Error! Bookmark not defined.
Figura 33: Comparação entre os mapas do PPRSC (esquerda) e do PSMS (direita).	Error! Bookmark not defined.
Figura 34: Mapa de favorabilidade com base na sobreposição dos fatores para ocorrências auríferas. As mineralizações em Au estão representadas pelos círculos em branco.	60

Lista de Tabelas

Tabela 1: Domínio Gamaespectrométricos e suas distribuições de elementos.	49
Tabela 2: Valores dos dados estatísticos dos projetos.	Error! Bookmark not defined.

Lista de Siglas

ASA – Amplitude do Sinal Analítico

Au - Ouro

BARMP – *Brazil Airborne Radiometric Mapping Project*

CMA – Campo Magnético Anômalo

CMB – Complexo Metamórfico Brusque

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CPS – Contagens por Segundo

eTh – Tório Equivalente

eU – Urânio Equivalente

FK – Feldspato Alcalino

GHT – Gradiente Horizontal Total

IGRF – *International Geomagnetic Reference Field*

ISA – Inclinação do Sinal Analítico

K - Potássio

Kd – Potássio Anômalo

MDT – Modelo Digital de Terreno

MeV – Mega EletronVolt

PF – Parâmetro F

PPM – Partes por Milhão

PPRSC – Projeto Paraná – Santa Catarina

PSMS – Projeto Serra do Mar Sul

RTP – *Reduction to the Pole*

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

ST – *Signum Transform*

Th - Tório

U - Urânio

Ud – Urânio Anômalo

ZCIP – Zona de Cisalhamento Itajaí – Perimbó

ZCMG – Zona de Cisalhamento Major Gercino

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	OBJETIVOS	12
1.2.	ÁREA DE ESTUDO	12
2.	MATERIAIS E MÉTODOS	13
2.1.	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	14
2.1.1.	Gamaespectrometria	15
2.1.1.1.	Parâmetro F	18
2.1.1.2.	Potássio e Urânio Anômalos (Kd e Ud)	18
2.1.2.	Magnetometria	19
2.1.2.1.	Redução ao Polo ou <i>Reduction to the Pole</i> (RTP)	20
2.1.2.2.	Continuação Ascendente ou <i>Upward Continuation</i>	21
2.1.2.3.	Gradientes Horizontais (Gx e Gy) e Vertical (Gz)	21
2.1.2.4.	Gradiente Horizontal Total (GHT)	21
2.1.2.5.	Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	22
2.1.2.6.	Inclinação do Sinal Analítico (ISA)	22
2.1.2.7.	Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (GHT-ISA)	22
2.1.2.8.	Inclinação Do Sinal Analítico Do Gradiente Horizontal Total (ISA-GHT)	23
2.1.2.9.	Signum Transform	23
2.1.2.10.	Deconvolução de Euler	23
2.1.3.	O Projeto Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina (2009 – 2011)	24
2.1.4.	Processamento dos Dados	26
2.1.5.	Interpretação e Integração	28
2.1.6.	Definição das Zonas de Favorabilidade	28
3.	CONTEXTO GEOLÓGICO E TECTÔNICO	29
3.1.	Complexo Ribeirão da Prata	31
3.2.	Complexo Metamórfico Brusque	34
3.3.	Intrusões Graníticas	36
3.4.	Grupo Itajaí	38
3.5.	Intrusões Mesozoicas	40
3.6.	Depósitos Quaternários	40
3.7.	Evolução Tectônica e Aspectos Estruturais	41
3.8.	Metalogenia	42
4.	RESULTADOS	44
4.1.	Magnetometria	44
4.2.	Gamaespectrometria	49
4.3.	Parâmetros Sugestivos de Alteração Hidrotermal	53

4.4.	Integração dos dados Magnéticos e Radiométricos	55
4.5.	Zonas de Favorabilidade	59
5.	CONCLUSÃO	60
6.	ARTIGO	62
6.1.	INTRODUCTION	63
6.2.	THE RESEARCH AREA	63
6.3.	GEOLOGICAL SETTING	64
6.3.1.	Ribeirão da Prata Complex	65
6.3.2.	Brusque Metamorphic Group	65
6.3.3.	Granitic Intrusions	67
6.3.4.	Itajaí Group	69
6.3.5.	Mesozoic Intrusions	69
6.3.6.	Tectonic and Structural Evolution	70
6.3.7.	Mineralization	71
6.4.	MATERIAL AND METHODS	71
6.4.1.	Gamma-Ray Spectrometry	71
6.4.2.	Magnetometry	74
6.4.3.	SMSP and PRSCP	75
6.5.	DISCUSSION AND RESULTS	76
6.5.1.	Magnetic Data Interpretation	76
6.5.2.	Radiometric Data Interpretation	80
6.5.3.	Hydrothermal Alteration Suggestive Parameters	82
6.5.4.	Magnetic and Radiometric Integration	85
6.5.5.	SMSP and PRSC Comparison	88
6.5.6.	Favorable Zones Definition	93
6.6.	CONCLUSION	94
6.7.	AKNOWLEDGEMENTS	95
7.	REFERÊNCIAS	96

1. INTRODUÇÃO

O ouro está entre os primeiros metais a serem explorados pela humanidade, devido a sua beleza e imperecibilidade, maleabilidade e facilidade em se manufaturar objetos e por ocorrer comumente em sua forma nativa. Artefatos produzidos em ouro datam de mais de 5.000 anos, e são encontrados em tumbas e templos de antigas civilizações. Desde então tem sido objeto de desejo tanto dos alquimistas da Idade Média e exploradores do Renascimento a investidores do mercado atual, pois este metal está fortemente associado ao poder e à riqueza. Atualmente, é utilizado por muitas nações como reserva monetária e meio de troca em transações, com valores em ascensão ano após ano, entre altas e quedas. Além de sua importância como fonte de valor, também tem aplicações na joalheria, eletrônica, indústria química, aeroespacial, na medicina e odontologia, sendo portanto um elemento de suma importância para a sociedade desde sua descoberta até os dias atuais.

Historicamente, a porção leste do estado de Santa Catarina, mais especificamente as regiões de Brusque e Botuverá, são conhecidas pela ocorrência de ouro, com os primeiros registros datando do Século XVIII, e auge da atividade garimpeira nos anos 1930, onde chegou-se a ser extraídos cerca de nove quilogramas de ouro por mês (Abreu, 2012). Diversas mineralizações auríferas primárias – veios de quartzo e sulfetos ou lentes de sulfetos maciços em meio a turmalinitos e cherts foram reconhecidas e estudadas nessas regiões. Em 1995, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), através do mapeamento das Folhas Brusque e Botuverá, na escala 1:50.000, produziu cartas metalogenéticas/previsionais, evidenciando áreas mineralizadas e com potencial para mineração. Diversas ocorrências da Folha Botuverá, em especial o Depósito do Cavalo Branco, foram estudadas por Biondi et al. (2007), que estimou para esta mineralização uma reserva de 1 a 2 toneladas de ouro em minério com teor entre 20 a 40 g/ton de Au, e as classificou como depósitos do tipo hidrotermal magmático influenciado por zonas de cisalhamento. Segundo Toniolo & Kirchner (1994) (*apud* Castro, 1997), estas mineralizações são consideradas as principais ocorrências auríferas em Santa Catarina. Através destes trabalhos e dados históricos, é possível se observar o potencial das regiões de Brusque e Botuverá para a ocorrência de ouro, consolidando-as como importantes alvos de pesquisa mineral.

A aplicação de levantamentos aerogeofísicos, em especial magnetométricos e gamaespectrométricos, tem sido amplamente discutida e estudada como método complementar em projetos de mapeamento geológico e de pesquisa mineral, apresentando resultados positivos no reconhecimento de unidades geológicas, estruturas e áreas potencialmente mineralizadas. Através da gamaespectrometria, é possível a detecção dos elementos Potássio (K), Urânio (U) e Tório (Th) na superfície terrestre, muitas vezes associados a zonas de alteração hidrotermal, e por consequência, a ocorrências minerais, enquanto que a magnetometria evidencia a

presença de estruturas, como falhas e zonas de cisalhamento ou rochas ricas em minerais magnéticos, como anfibólitos. Irvine & Smith (1989) consideram a utilização de levantamentos aéreos magnéticos/radiométricos de detalhe fundamental na fase de exploração regional a semiregional, através do delineamento de sistemas de alteração hidrotermal e estruturas, enquanto que Shives et al (2000) estabelecem áreas onde picos de potássio e de campo magnético convergem como guia para a ocorrência de depósitos polimetálicos. Dessa forma, é possível observar a relevância de dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos para a identificação de mineralizações.

O uso de levantamentos aerogeofísicos na identificação de alvos exploratórios para ouro já foi anteriormente aplicado na região por Fornazzari & Ferreira (2003), com resultados positivos obtidos através da análise de perfis gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul, de 1977, reprocessados pelo *Brazilian Airborne radiometric Mapping Project* (BARMP) em 1997. O presente trabalho fez uso dos dados do Projeto Aerogeofísico Paraná – Santa Catarina, de 2011, realizado com tecnologia mais moderna e maior resolução espacial em relação ao Projeto Serra do Mar Sul. Desta forma, os resultados apresentados são mais precisos e com melhor definição dos alvos, além de também considerar os dados magnetométricos e a integração de informações geológicas e estruturais na definição das zonas de favorabilidade.

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho apresenta como principal objetivo definir zonas de favorabilidade para a ocorrência de mineralizações auríferas primárias nas Folhas Brusque e Botuverá, através da integração de dados radiométricos, magnéticos, geológicos, estruturais e exploratórios. Propõe-se também comparar a resposta do levantamento geofísico com o arcabouço geológico da área de estudo, e dessa forma avaliar a correspondência entre estes dados, e, portanto, a efetividade do Projeto Paraná – Santa Catarina em estudos de mapeamento e pesquisa mineral.

1.2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde às Folhas 1:50.000 de Brusque e Botuverá, localizadas na região leste do estado de Santa Catarina, e limita-se pelas coordenadas $49^{\circ}15'00''$ W; $27^{\circ}00'00''$ S; $48^{\circ}45'00''$ W e $27^{\circ}15'00''$ S. Possui área de 1.364 km², abrangendo parcialmente os municípios de Blumenau, Gaspar, Brusque, Itajaí, Camboriú, Tijucas, Canelinha, São João Batista, Nova Trento, Botuverá, Vidal Ramos, Presidente Nereu, Apiúna, Indaial e completamente o município de Guabiruba. O acesso é feito principalmente através da BR-486, que corta a área no sentido NE-SW, a partir de Itajaí, e pela SC-108, saindo de Gaspar em direção ao sul, conforme a Figura 1

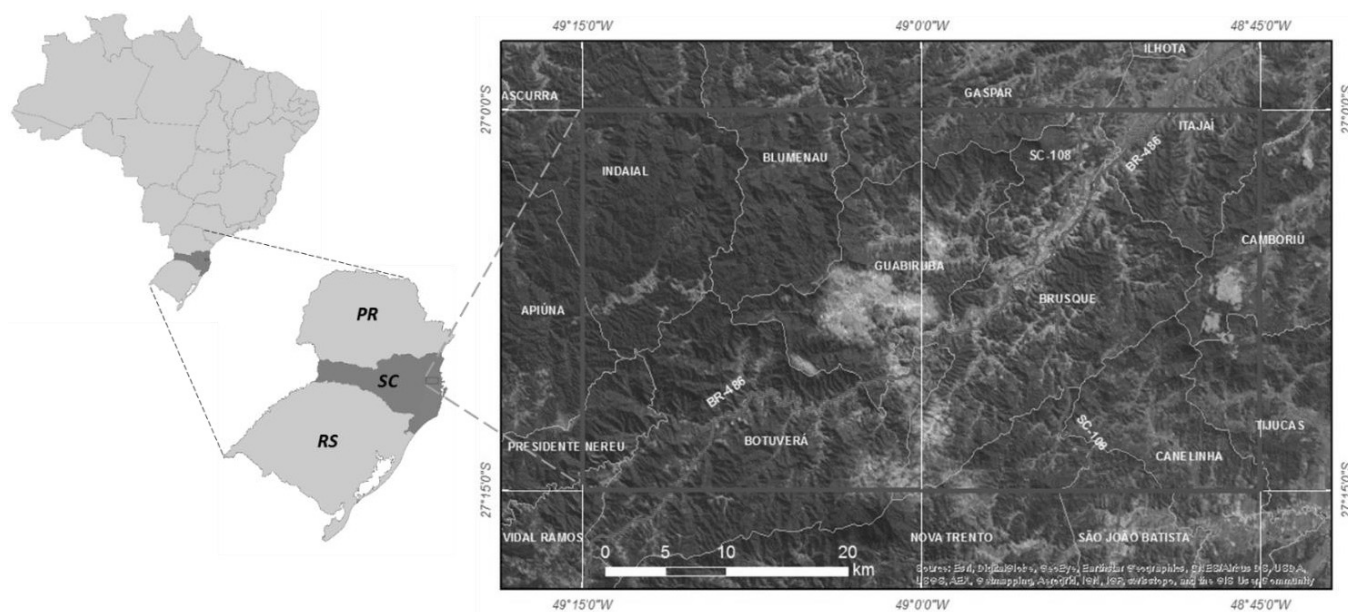


Figura 1: Localização da área de estudo (em azul) e os principais acessos (em vermelho).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os dados magnéticos e radiométricos do Projeto Paraná – Santa Catarina (PPRSC), cedidos pela CPRM em formato *.gdb* (*geodatabase*), e processados através do *software Oasis Montaj 6.4.2*, bem como dados cartográficos das Folhas Botuverá e Brusque (1:50.000), Vidal Ramos e Brusque (1:100.000) e do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina (1:500.000), e dados de hidrografia do EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina) e modelo digital de terreno (MDT) no projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*, da NASA, cedidos pelo INPE), todos integrados a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) através do programa *ArcGIS 10.1*. Além dos dados e programas, também foram empregados artigos e trabalhos que abordaram a aplicação de métodos geofísicos e a geologia local e regional da área de estudo, com o objetivo de construir o arcabouço teórico e fundamentar os métodos utilizados.

A partir dos objetivos e dos materiais, foram definidos os métodos mais adequados para se chegar aos resultados desta pesquisa. Através do levantamento bibliográfico buscou-se trabalhos que discutam os métodos geofísicos e/ou suas aplicações na exploração mineral e mapeamento geológico, bem como aqueles que discorrem sobre a geologia, evolução tectônica, estrutural e metalogenia da área de estudo, servindo como embasamento teórico e conceitual para a realização das demais atividades. Por meio do processamento dos dados do PPRSC, foram gerados *grids* a partir do *.gdb* (banco de dados matricial), e aplicados métodos e funções matemáticas para se realçar determinadas feições, como centros e /ou bordas de corpos magnéticos ou zonas de acúmulo de elementos radioativos associados à zonas de alteração

hidrotermal. Com a realização do processamento, foi efetuada a interpretação dos sinais geofísicos, e então a integração aos dados de mapas, através da construção de um SIG (Sistema de Informações Geográficas). Após a interpretação e integração, foi feita a determinação das zonas de favorabilidade, a partir da definição e sobreposição de fatores que sejam potenciais ou não potenciais para a presença de mineralizações em ouro. Um fluxograma da pesquisa com as etapas do estudo é apresentado na **Figura 2**.

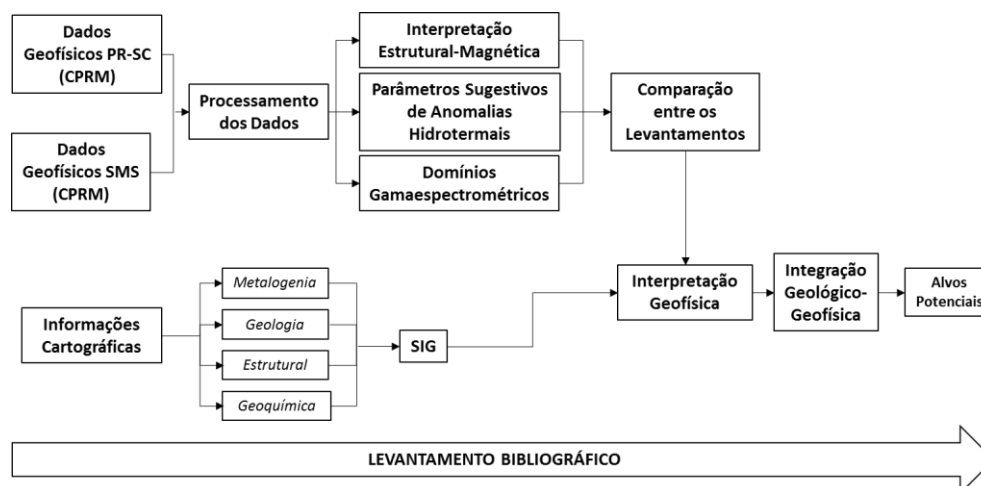


Figura 2: Fluxograma da pesquisa.

2.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A bibliografia utilizada neste trabalho pode ser individualizada em quatro grupos: **(i)** contexto tectônico e geológico da área de estudo; **(ii)** conceitos e aplicações dos métodos gamaespectrométrico e magnetométrico; **(iii)** processos hidrotermais e metalogenia dos depósitos de ouro e **(iv)** cartografia da área de estudo. Alguns destes trabalhos abordam mais de um dos temas, contribuindo de forma mais abrangente à discussão.

Estudos referentes à evolução tectônica, estrutural, metamórfica, estratigráfica e geocronológica (grupo i) foram abordados a fim de reconhecer o contexto geológico local e regional. Entre estes, os trabalhos de Basei (1985), Silva *et al.* (2000), Basei (2000), Castro *et al.* (2003), Basei *et al.* (2010) abordam a evolução tectônica neoproterozoica do Cinturão Dom Feliciano e terrenos do leste de Santa Catarina, contexto no qual está inserida a área de estudo, e suas relações com terrenos e cinturões adjacentes. Entre os trabalhos que discorrem sobre o Complexo Metamórfico Brusque sob o aspecto da estratigrafia, geocronologia, evolução estrutural e metamorfismo, destacam-se os de Silva (1991), Philipp *et al.* (2004) e Basei *et al.* (2011b). As pesquisas referentes à Bacia do Itajaí utilizadas foram Rostirolla *et al.* (1992), Schroeder (2006), Basei *et al.* (2011a) e Costa & Nascimento (2015). Entre os trabalhos que tratam do magmatismo e intrusões graníticas, bem como de sua geoquímica, geocronologia,

origem, tectônica e caracterização, foram utilizados Castro (1997), Philipp & Campos (2010), Campos (2011), e Hueck *et al.* (2016). Renne *et al.* (1992) e Conceição *et al.* (1988) discutem os eventos relacionados ao processo de rifte do Atlântico Sul e seus produtos.

O conteúdo bibliográfico utilizado para o embasamento teórico-geofísico (grupo ii) consiste em trabalhos teóricos, que discorrem sobre os métodos e discutem suas aplicações em modelos e estudos de caso, assim demonstrando os resultados obtidos. Os trabalhos de Nabighian (1972), Roest *et al.* (1992), Miller & Singh (1994), Ferreira *et al.* (2010, 2013) e Souza & Ferreira (2012, 2013, 2015) tratam e discutem métodos magnéticos sobre modelos teóricos, com posterior aplicação em casos reais. Cordell & Grauch (1985), Castro *et al.* (2003) e Castro (2015) utilizam os métodos magnéticos e radiométricos aplicados ao mapeamento geológico, interpretação estrutural e pesquisa mineral. Os artigos publicados por Ostrovskiy (1975), Gnojek & Prichystal (1985), Portnov (1987), Saunders *et al.* (1994), Irvine & Smith (1990), Pires (1995), Zhang *et al.* (1997), Ferreira *et al.* (2009), Shives *et al.* (2001), Fornazzari & Ferreira (2003), Ulbricht *et al.* (2009) e El-Nabi (2011) discutem o uso dos métodos gamaespectrométricos no mapeamento geológico e pesquisa mineral e apresentam resultados efetivos. Minty (1997), Dickson & Scott (1997) e Ribeiro *et al.* (2013) discutem o método gamaespectrométrico, a aplicação dos levantamentos e quais respostas dos elementos às técnicas empregadas.

Entre as investigações sobre mineralizações de ouro na região de Botuverá e Brusque (grupo iii), destacam-se os trabalhos de Caldasso *et al.* (1995), que definiram áreas mineralizadas e/ou previsionais para ouro, com base na presença de feições geológicas características (veios sulfetados, alterações hidrotermais) e de dados de amostragem geoquímica (concentrado de bateia), bem como na descrição das feições mineralizadas. Artigos que abordam a metalogênese na área da Bacia de Itajaí (Biondi *et al.* 1992) e no Complexo Brusque e intrusões graníticas (Biondi *et al.* 2007), que são o principal alvo deste trabalho, também foram utilizados para o reconhecimento do sistema mineralizador.

Entre os mapas do grupo (iv) utilizados para a contextualização geológica regional e local, encontram-se o Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina (Wildner *et al.*, 2014), elaborado pela CPRM, que apesar de ter sido produzido em uma escala de menor detalhe (1:500.000), traz uma proposta litodêmica, estrutural e geocronológica mais atualizada, as Folhas 1:100.000 Brusque e Vidal Ramos, elaboradas pela CPRM em convênio com a USP, e as Folhas 1:50.000 Brusque e Botuverá, bem como seus relatórios.

2.1.1. Gamaespectrometria

O método gamaespectrométrico consiste na medição da abundância relativa ou concentração de potássio (^{40}K), urânio (^{238}U) e tório (^{232}Th) dos primeiros 30 a 40 centímetros da superfície terrestre, através da detecção da radiação gama produzida pelo processo de

decaimento radioativo destes elementos. Por meio de um gamaespectrômetro, mede-se a radiação emitida no intervalo de 0,41 a 2,81 MeV (milhões de *eletron-volt*), denominada contagem total. Neste intervalo, cada um dos três elementos possui uma janela energética associada a um canal do detector, conforme a Figura 3. Apesar de o urânio e o tório não emitirem radiação gama diretamente, elementos de suas séries de decaimento (^{214}Bi para o ^{238}U e ^{208}Tl para o ^{232}Th) o fazem, sendo então as medidas para U e Th referidas como equivalentes (eU e eTh) (Ribeiro *et al.* 2013).

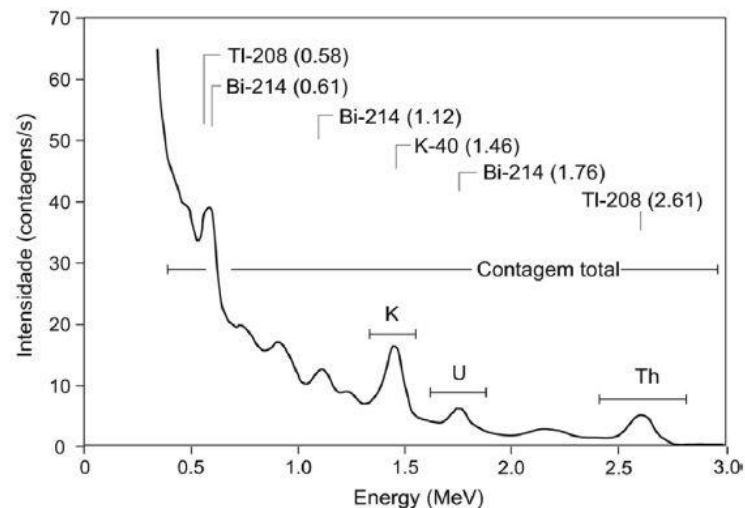


Figura 3: Janelas energéticas dos elementos radioativos. Extraído de Ribeiro *et al.* (2013).

O método gamaespectrométrico permite apenas a identificação de elementos nos primeiros 30 a 40 centímetros da superfície devido ao fato da emissão de raios gama ser inversamente proporcional à densidade do meio em que atravessa, e qualquer matéria situada entre a fonte de radiação e o sensor afeta consideravelmente a detecção. Fatores como a cobertura de solo, umidade, vegetação, temperatura, umidade atmosférica, topografia e efeitos direcionais (quando a janela do detector não encontra-se paralela ao plano medido) podem influenciar a coleta de dados radiométricos. Em levantamentos aerogamaespectrométricos, a altura da aeronave, espaçamento entre as linhas de voo também influenciam a aquisição (Dickson & Scott, 1997; Minty, 1997; Ribeiro *et al.* 2013).

O potássio ocorre comumente em feldspatos como ortoclásio e microclínio, nos minerais do grupo da mica – flogopita, biotita e muscovita, e em argilominerais formados por processos hidrotermais ou diagenéticos, tais como a illita e illita/smectita. Por esta característica, este elemento é frequentemente associado a rochas que possuam estes minerais em sua composição, como rochas ígneas de composição félsica – granitos leucocráticos e alcalinas, bem como suas correspondentes vulcânicas, em rochas metamórficas de composição feldspática ou micácea, como filitos, xistos e gnaisses, e também em rochas sedimentares como argilitos,

folheos e arcóseos (Dickson & Scott, 1997; Ulbricht *et al.* 2009). A alta mobilidade geoquímica é outra característica importante do potássio, pois sua fácil solubilização e transporte tanto por processos intempéricos quanto hidrotermais pode concentrá-lo secundariamente, e, portanto, não estar necessariamente associado a sua fonte original, e sim a acumulações relacionadas à topografia e drenagem, como aluviões e colúvios, ou a zonas de alteração hidrotermal potássica, rica em quartzo, feldspato potássico e biotita, muitas vezes associadas a ocorrências minerais, sendo portanto um importante guia na definição de áreas mineralizadas.

O urânio e o tório são elementos menos abundantes que o potássio, e estão frequentemente presentes nos minerais acessórios de rochas graníticas, como a allanita, apatita, monazita, zircão, titanita, torita e uraninita. Estão associados especialmente a granitos peralcalinos, acompanhados ou não de manifestações aplíticas e pegmatíticas, e costumam marcar a atuação de processos pós-magmáticos e hidrotermais, eventualmente vinculados a mineralizações de interesse econômico. Apesar de possuírem origens e associações semelhantes, seus comportamentos geoquímicos são bastante diferentes. Enquanto que o urânio (U^{+6}) é bastante solúvel, e portanto de grande mobilidade em ambientes oxidantes, o tório apresenta baixa mobilidade geoquímica, e tende a se manter em sua fonte primária, sendo assim importante na definição da distribuição original dos elementos detectados pela gamaespectrometria (Dickson & Scott, 1997; Ulbricht *et al.* 2009).

A partir do comportamento geoquímico destes elementos, é possível observar que a atuação de processos hidrotermais, metamórficos, metassomáticos, pós-magmáticos e intempéricos influenciam suas concentrações (Ribeiro *et al.* 2013; El Nabi 2013, Ulbricht *et al.* 2009), podendo provocar interpretações incorretas sobre suas fontes originais (Minty, 1997; Zhang *et al.* 1997). Através de relações entre estes elementos, é possível se destacar a distribuição dos elementos conforme suas concentrações primárias, atenuando-se fatores como topografia, clima e drenagem e, em alguns casos, realçar processos hidrotermais. Entre estas operações, destacam-se as razões eTh/K , eU/eTh , eU/K , o Parâmetro F de Efimov (1978) e os parâmetros sugestivos de alteração hidrotermal – Kd e Ud , de Saunders *et al.* (1994).

As altas razões K/eTh e K/eU evidenciam áreas enriquecidas em potássio de origem primária ou hidrotermal, reduzindo efeitos de agentes superficiais, pois apesar de o potássio ser mais móvel entre os três radioelementos, ao se analisar sua distribuição em função do U e Th, os picos tendem a marcar áreas onde a concentração de K está relacionada a sua rocha fonte (Dickson & Scott, 1997; Ribeiro *et al.* 2013). Portnov (1987) definiu que áreas com razão K/eTh superiores a 0,2, são especializadas em tório ou potássio, em geral associadas a alterações hidrotermais. Ostrovskiy (1975) (*apud* Gnojek & Prichystal, 1985) aponta que o antagonismo entre o potássio e o tório é um importante guia na identificação de alterações hidrotermais potencialmente mineralizadas.

Conforme o teor de silício aumenta nas rochas, também aumenta a concentração de radioelementos, com o tório apresentando maior enriquecimento nas rochas mais evoluídas (Dickson & Scott, 1997; Ferreira *et al.* 2009; e Ribeiro *et al.* 2013). Portanto a razão eTh/eU é utilizada para se investigar o grau de diferenciação de suítes ígneas, no entanto não costuma ser aplicada na definição de processos hidrotermais (Gnojek & Prichystal, 1985).

Os principais métodos de pesquisa de zonas de alteração hidrotermal empregados em gamaespectrometria, são o Parâmetro F, Kd e Ud, e as composições ternárias. O fluxograma da **Figura 4** mostra os principais processos utilizados no tratamento de dados gamaespectrométricos.

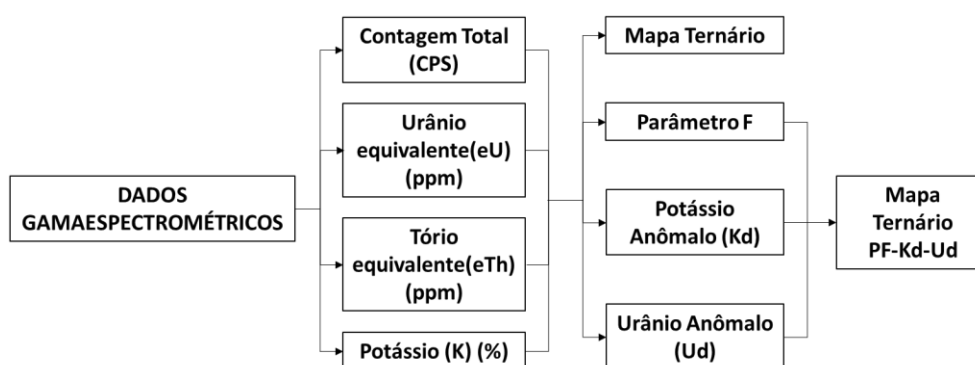


Figura 4: Principais técnicas de processamento aplicadas aos dados gamaespectrométricos.

2.1.1.1. Parâmetro F

O Parâmetro F, descrito por Efimov (1978), tem como objetivo evidenciar a abundância de potássio e a razão U/Th simultaneamente, e é determinado através da seguinte fórmula:

$$F = K * \left(\frac{U}{Th}\right)$$

A partir desta relação, áreas enriquecidas em potássio são destacadas em relação à razão eU/eTh, que já apresentam diferenciação, evidenciando zonas afetadas por alteração hidrotermal em rochas evoluídas, ou seja, com grande potencial para a existência de mineralizações (Gnojek & Prichystal, 1985). Efimov (1978) (*apud* Gnojek & Prichystal, 1985) definiu valores de parâmetro F entre 1,2 a 1,3 para rochas não alteradas, enquanto valores que vão de 2 a 5, chegando a 10 em raros casos, para regiões hidrotermalizadas.

2.1.1.2. Potássio e Urânio Anômalos (Kd e Ud)

Segundo Saunders *et al.* (1994), as concentrações de tório e potássio na superfície estão distribuídas de acordo com uma função linear que passa pela origem, com sua inclinação determinada pela razão entre os valores reais observados de potássio (K_s) e de tório (Th_s), com a mesma regra valendo para o urânio (U_s), conforme as seguintes relações:

$$K_i = \left(\frac{\bar{x}K_s}{\bar{x}Th_s} \right) * Th_s$$

$$U_i = \left(\frac{\bar{x}U_s}{\bar{x}Th_s} \right) * Th_s$$

Onde K_i e U_i são valores ideais de potássio, calculados com base na concentração de tório. A partir das medidas reais e ideais, são determinados valores anômalos (K_d para o potássio e U_d para urânio), ou seja, valores superiores aos ideais para determinada leitura radiométrica, conforme a equação a seguir:

$$K_d = (K_s - K_i)/K_i$$

$$U_d = (U_s - U_i)/U_i$$

Através do K_d , acumulações anômalas de potássio, em geral associadas a processos hidrotermais, são realçadas (Pires, 1995), enquanto que o U_d apresenta resultados menos expressivos.

2.1.2. Magnetometria

Através do método magnetométrico, busca-se medir o campo magnético que deriva das rochas e estruturas, onde existam minerais que retêm parte da magnetização do Campo Magnético Terrestre no momento de sua cristalização, chamado então de Campo Magnético Anômalo (CMA) ou Campo Magnético Remanescente (Telford *et al.* 1990).

O campo magnético medido na superfície terrestre provém de três fontes: **a) Campo Principal**, originado pelo movimento de matéria líquida, possivelmente composta por níquel e ferro, no Núcleo Externo da Terra; **b) Campo Externo**, relacionado a atividades solares, lunares e a tempestades elétricas; e **c) Anomalias Magnéticas**, resultantes da presença de minerais magnéticos nas rochas próximas à superfície terrestre, e são objeto de estudo da magnetometria (Telford, 1990). As fontes das anomalias magnéticas locais alcançam até aproximadamente 40 km de profundidade, pois abaixo disso a crosta atinge a Temperatura de Curie (550 °C), onde as rochas e minerais perdem suas propriedades magnéticas.

A partir dos dados coletados pelo magnetômetro, processamentos são realizados a fim de se obter somente o CMA; a Correção da Variação Diurna busca anular variações relacionadas a tempestades magnéticas e atividades solares é feita através de um magnetômetro terrestre

fixado em um ponto específico, a Redução do IGRF é a subtração do Campo Principal, representado pelo *International Geomagnetic Reference Field* – IGRF. Além destes processamentos, para a área de estudo foi necessário proceder a Redução ao Polo (*Reduction to Pole* – RTP), pois esta encontra-se em uma latitude onde a direção do campo magnético provoca uma bipolaridade nas anomalias, podendo causar dificuldades de interpretação. A RTP simula os dados como se tivessem sido coletados nos pólos magnéticos, onde a inclinação do campo magnético é 90°, e portanto não causando a bipolaridade, e com isso os picos das leituras ficam alocados exatamente sobre as anomalias que os causam, aumentando a precisão e facilidade da interpretação.

Através dos métodos de realce de anomalias, que baseiam-se na derivadas direcionais do Campo Magnético Anômalo (CMA), ou simplesmente anomalia magnética, procura-se destacar feições específicas, como os centros ou bordas das anomalias, e assim facilitar a interpretação magnético-estrutural (Castro, 2015). A seguir serão descritos os principais métodos de realces de anomalias utilizados (Figura 5).

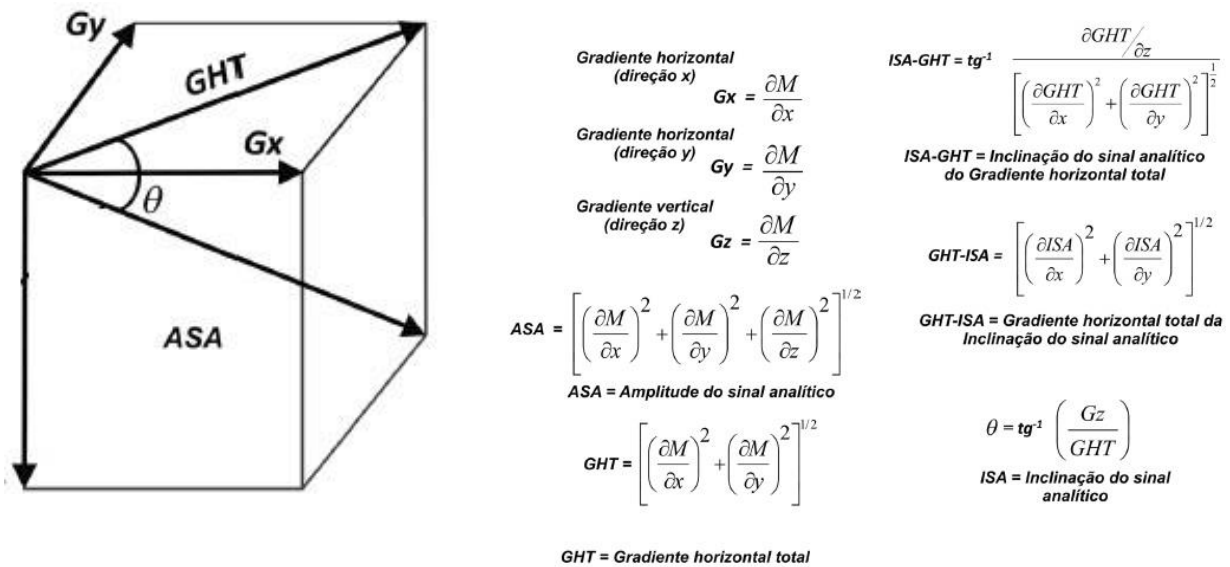


Figura 5: Métodos de realce de anomalias.

2.1.2.1. Redução ao Polo ou *Reduction to the Pole* (RTP)

Através da RTP, a bipolaridade das anomalias é minimizada, centralizando os sinais diretamente sobre as fontes. Para este processamento, é necessário se saber a declinação e a inclinação magnética da região a ser processada, bem como a data do aerolevantamento. Este método transforma simula a aquisição os dados magnéticos medidos com qualquer inclinação do campo magnético ao observado nos pólos magnéticos (inclinação de aproximadamente 90°). Com isso, os picos dos valores de RTP correspondem o mais próximo possível do centro das

anomalias, enquanto que assimetrias correspondem mais precisamente as estruturas e os mergulhos dos corpos (Isles & Ranking 2013) (**Figura 6**).

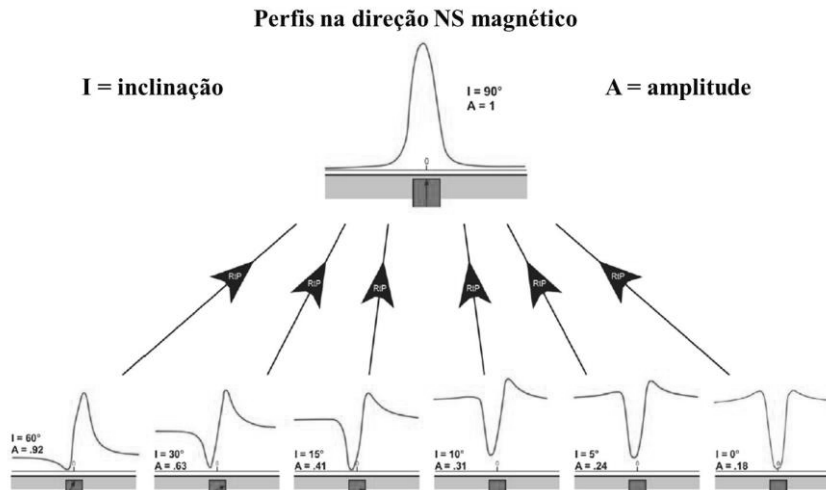


Figura 6: Processo de Redução ao Polo. Extraído de Isles & Rankin (2013)

2.1.2.2. Continuação Ascendente ou *Upward Continuation*

A *upward continuation*, considerado um filtro de limpeza dos dados magnetométricos, tem por objetivo atenuar sinais de alta frequência espacial, em geral associados a fontes rasas e ruídos, simulando a aquisição dos dados a uma altura superior àquela do aerolevantamento. O resultado deste processo é a suavização do sinal, ressaltando fontes mais profundas e estruturas maiores.

2.1.2.3. Gradientes Horizontais (G_x e G_y) e Vertical (G_z)

Os gradientes horizontais G_x e G_y são obtidos através da derivação da anomalia magnética, preferencialmente no domínio do espaço, nos sentidos x e y , e desta forma destacam as anomalias perpendiculares à estas direções. Através do G_x e G_y é possível se diferenciar a profundidade das anomalias. O G_z consiste na derivação do campo magnético no domínio da frequência, e não no domínio do espaço. Com este filtro, sinais de maior frequência são realçados, em detrimento aos de menor frequência, ressaltando as fontes mais rasas (Cordell & Grauch, 1985).

2.1.2.4. Gradiente Horizontal Total (GHT)

Obtido através das derivadas horizontais G_x e G_y , o GHT permite o realce de variações abruptas do sinal em um grid regular. O resultado disto é o realce nas bordas de corpos magnéticos, e desta forma portanto apresenta resultados positivos na cartografia geológica. No entanto as amplitudes das anomalias decrescem conforme a profundidade das fontes. É dado pela seguinte fórmula:

$$GHT = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}$$

Onde $\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)$ e $\left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)$ equivalem às derivadas horizontais Gx e Gy da anomalia M do campo magnético medido (Cordell & Grauch, 1985).

2.1.2.5. Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

A Amplitude do Sinal Analítico (ASA) consiste em uma função simétrica estabelecida a partir das derivadas Gx, Gy e Gz do CMA, resultando no realce das bordas de corpos largos e centros de corpos estreitos. A fórmula do ASA se dá pela expressão a seguir:

$$ASA = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2}$$

Onde $\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)$ corresponde à derivada vertical Gz. De forma semelhante ao GHT, as respostas dos sinais estão relacionadas às profundidades das fontes. Sendo assim, meias larguras dos sinais podem indicar a profundidade dos corpos e/ou estruturas (Cordell & Grauch, 1985; Roest et al., 1992).

2.1.2.6. Inclinação do Sinal Analítico (ISA)

A Inclinação do Sinal Analítico (ISA) é definida pelo ângulo formado entre Gz (derivada vertical do CMA) e GHT, e tem como principal propriedade equalizar as amplitudes das anomalias, e dessa forma o sinal responde igualmente para diferentes profundidades. Outra importante propriedade do ISA é que o sinal incide sobre os centros dos corpos (Nabighian, 1972; Roest et al. 1992; Miller & Singh, 1994). O ISA é definido pela seguinte função:

$$ISA = \tan^{-1}\left(\frac{Gz}{GHT}\right)$$

2.1.2.7. Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (GHT-ISA)

A aplicação do GHT sobre os dados resultantes do ISA resulta no realce de estruturas e corpos que não são evidentes nos demais métodos. A independência da inclinação magnética e das amplitudes das anomalias constituem os principais atributos deste método. Entretanto, é sensível a médias frequências e, do mesmo modo que nos métodos GHT e ASA, as amplitudes diminuem com o aumento da profundidade das fontes, e portando mais efetivo no realce de estruturas mais rasas (Verduzco et al. 2004). É expresso pela equação:

$$GHT-ISA = \sqrt{\left(\frac{\partial ISA}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial ISA}{\partial y}\right)^2}$$

2.1.2.8. Inclinação Do Sinal Analítico Do Gradiente Horizontal Total (ISA-GHT)

A aplicação do ISA sobre o GHT é utilizada no mapeamento de estruturas e alvos de exploração mineral, pois destaca feições não claramente identificadas por outros métodos. Uma das vantagens do ISA-GHT, de acordo com Ferreira *et al.* (2010, 2013), é a melhor resolução das bordas dos corpos, uma vez que a ISA equaliza as amplitudes do GHT, e assim realça simultaneamente o sinal de corpos posicionados em profundidades distintas (Ferreira *et al.* 2010, 2013). Abaixo encontra-se a expressão que define o ISA-GHT:

$$ISA-GHT = \tan^{-1} \left(\frac{\left(\frac{\partial GHT}{\partial z} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{\partial GHT}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial GHT}{\partial y} \right)^2 \right]}} \right)$$

2.1.2.9. Signum Transform

O *Signum Transform* consiste basicamente na aplicação de uma função f , que resulta basicamente em duas possibilidades: (1) ou (-1), da seguinte forma:

$$ST = \begin{cases} \frac{f}{|f|}, & \text{para } f \neq 0 \\ -1, & \text{para } f = 0 \end{cases}$$

Desta forma, espera-se que os valores de f sejam (1) sobre as anomalias e (-1) fora delas. O resultado esperado é que as fontes sejam representadas por “platôs” onde o valor seja (1). O *Signum Transform* serve principalmente para delinear feições como diques e estruturas (falhas, fraturas etc.) (Souza & Ferreira, 2012, 2013, 2015).

2.1.2.10. Deconvolução de Euler

Tem como propriedade determinar a profundidade das fontes das anomalias, e por meio de janelas móveis são selecionadas anomalias para as quais estima-se esta profundidade. Este método utiliza-se da inversão da Equação da Homogeneidade de Euler, relacionando as derivadas x , y e z com a localização das fontes, com base no grau de homogeneidade (N), aplicado como o índice estrutural. É expressa pela seguinte fórmula:

$$(x - x_0) dT/dx + (y - y_0) dT/dy + (z - z_0) dT/dz = N(B - T)$$

Sendo que x_0 , y_0 e z_0 representam a posição da fonte magnética do campo T medido no ponto x, y, z , B representa o campo regional e N o índice estrutural, que está atrelado à geometria do corpo causador da anomalia.

Na **Figura 7** apresenta-se um quadro esquematizado com os processamentos aplicados à dados magnéticos.

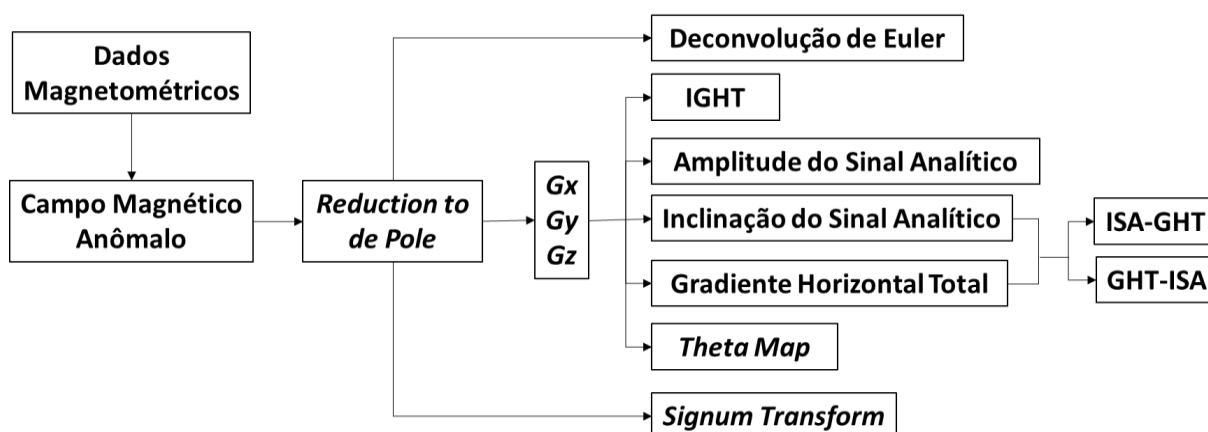


Figura 7: Principais técnicas de processamento aplicadas à dados magnéticos.

2.1.3. O Projeto Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina (2009 – 2011)

O Projeto Aerogeofísico Paraná – Santa Catarina foi realizado de 2009 a 2011 na região sul e sudeste do Brasil pela LASA PROSPECÇÕES S.A. em contrato com a CPRM, e estende-se em uma área de 65.562 km² na porção leste dos estados de Santa Catarina, Paraná e sudeste de São Paulo (Figura 8). Cerca de 140.397,98 km de perfis foram levantados, coletando dados magnetométricos e gamaespectrométricos de alta resolução espacial, onde afloram unidades pré-cambrianas. As linhas de voo e de controle foram realizadas com espaçamento de 500 e 10.000 metros e orientadas nas direções NS e EW, respectivamente. Os intervalos de amostragem dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos foram de 6 e 60 metros, nesta ordem, e a altura nominal de voo foi de 100 m.



Figura 8: Em azul, a localização do PPRSC, em vermelho, a área de estudo.

O levantamento foi realizado com três aeronaves; uma do modelo REIMS 406 – Caravan II e duas do modelo *Piper Navajo* – PA31, equipadas com: (a) um magnetômetro *Scintrex CS-3*; (b) um gamaespectômetro *Exploranium GR-820* integrado a um conjunto de cristais de iodeto de sódio; (c) um sistema de navegação *FASDAS*; (d) um sistema de aquisição GPS modelo *Trimble AgGPS 132 DGPS "Realtime"*; (e) uma câmera de vídeo *Panasonic WV-484*; (f) radares altímetros modelo *KING 405* (para a aeronave *Caravan II*) e *Collins ALT-50* (Aeronaves *PA31*); (g) um altímetro barométrico *Fugro/Enviro*; (h) sistema de aquisição *FASDAS*.

Para o processamento dos dados magnéticos, foram realizadas a correção do erro de paralaxe, remoção da variação magnética diurna, nivelamento dos perfis, micronivelamento dos perfis e remoção do IGRF, enquanto que para os dados espectrométricos foram efetuados os processamentos de correção do tempo morto, aplicação de fitragem, correção do erro de paralaxe, cálculo da altura efetiva de voo, remoção do *background* da aeronave e cósmico. Remoção do *background* do radônio, correção do efeito *Compton* e correção altimétrica.

O erro de paralaxe consiste na defasagem entre os tempos de medição do magnetômetro e altímetro com o sistema de posicionamento GPS. Para se determinar esta diferença, a aeronave executa uma linha especial de calibração, assim sendo possível quantificar o intervalo de tempo e então sincronizar os dados. A remoção da Variação Magnética Diurna é feita através da subtração de leituras magnéticas realizadas do magnetômetro terrestre fixo pelos dados coletados na aeronave, tendo estes em comum a hora de amostragem. Estes resultados,

positivos e negativos são então somados algebricamente ao nível base. O resultado desta operação corresponde à intensidade total do campo corrigido da variação diurna.

Segundo o relatório do Projeto Paraná-Santa Catarina (CPRM, 2011), não houve erro de paralaxe detectado nos dados radiométricos, que consiste na defasagem entre os tempos de medição do gamaespectrômetro ou magnetômetro e altímetro com o sistema de posicionamento GPS. A correção de tempo morto consiste na divisão das contagens dos canais radiométricos pelo tempo de amostragem registrado, para assim corrigir valores brutos dos canais Contagem Total, K, eU e eTh, e assim convertendo os dados para CPS. A aplicação de filtragem remove *spikes* (picos), ou utiliza um filtro *low-pass* para redução do erro estatístico nos dados, de leituras associadas à radiação cósmica e de radônio – elemento radioativo presente na atmosfera. A altura efetiva de voo é calculada com base na pressão atmosférica e temperatura durante o voo. A remoção do *background* da aeronave e cósmico é adquirido pela soma das contribuições da aeronave e da radiação cósmica em cada uma das janelas do gamaespectrômetro e a aplicação de um coeficiente obtido por uma medição realizada sobre o oceano, em área distante da costa. A remoção do *background* do radônio é feito através da leitura nos dados no canal do urânio, e remove dados referentes a este elemento. A correção do Efeito *Compton* elimina leituras geradas pela colisão de partículas de maior energia, formadas pelo espalhamento que ocorre dentro do cristal detector. A Correção Altimétrica busca referenciar valores coletados à altura nominal de voo, de cerca de 100 metros, eliminando possíveis anomalias causadas por elevações do terreno.

2.1.4. Processamento dos Dados

O processamento dos dados foi realizado a partir de dois programas: *Oasis Montaj* 6.4.2, desenvolvido pela *Geosoft*, e *ArcGIS 10.1*, criado pela *ESRI*. O *Oasis Montaj* foi aplicado principalmente no processamento dos dados aerogeofísicos do PPRSC, enquanto que o *ArcGIS* foi utilizado para o desenvolvimento do Sistema de Informações Geográficas (SIG) e integração de dados geológicos, geofísicos e cartográficos.

O processamento dos dados geofísicos do PPRSC inicia-se com o corte dos dados matriciais, no formato *geodatabase*, por um polígono idêntico à área de estudo (comando *window to polygon mask*) no *Oasis Montaj*, e então estes são transformados em *grids*, ou seja, em superfícies geradas a partir dos valores matriciais.

Para os dados magnéticos, a coluna dos dados corrigidos e reduzidos do IGRF é transformada em um *grid*, que consiste na distribuição dos dados em uma malha regular, gerando uma superfície que, neste caso, foi feita com espaçamento de 100 metros. Os dados foram interpolados pelo método bidirecional, que é utilizado quando a densidade de dados alinhados é muito alta (Santos *et al.*, 2016), considerando que o campo magnético é constante na superfície.

A partir deste *grid*, denominado CMA (Campo Magnético Anômalo), são feitos os demais processamentos: RTP (através do comando *reduction to magnetic pole*) e então os métodos de realce de anomalias GHT (obtido através das derivadas Gx e Gy), ASA e ISA (obtidos com a aplicação de Gz), *Signum Transform* e os métodos de segunda derivada: GHT-ISA e ISA-GHT, obtidos através de operações matemáticas entre si (comando *general expression* no *Oasis*).

O processamento dos dados radiométricos inicia-se com a eliminação de valores negativos dos canais do K, eU e eTh, decorrentes das correções realizadas anteriormente, uma vez que não é possível existirem concentrações negativas de elementos. Desta forma, verificou-se apenas valores negativos no canal do potássio, que foram corrigidos através da adição de uma constante aos valores, de forma que o menor valor nos dados seja 0,01 (Ulbricht *et al* 2009). Posteriormente, os quatro canais (potássio, urânio, tório e contagem total) foram transformados em *grids*, desta vez pelo método da mínima curvatura, que é aplicado quando os dados apresentam distribuição não homogênea, como é o caso dos dados radiométricos, tendo em vista que a emissão de radiação na superfície ocorre de forma irregular e não constante. Após a criação dos *grids*, são realizadas as operações matemáticas (através da função *general expression* do *Oasis*), sendo assim obtidas as razões entre os elementos, o Kd, Ud e Parâmetro F.

A construção do SIG e integração dos dados foi realizada com o programa *ArcGIS*, e procedeu-se através da estruturação de um projeto, onde os dados geofísicos e geológicos georreferenciados foram sobrepostos e analisados em conjunto. Os dados geológicos consistem de informações vetoriais, onde as unidades geológicas foram representadas por polígonos, as estruturas (falhas, zonas de cisalhamento, eixos de dobras e contatos) por linhas e as mineralizações como pontos, todos no formato *shapefile*, e a cada elemento destes arquivos, estão atribuídos valores e informações em uma tabela de atributos, como os litotipos que compõem as unidades geológicas, tipos de estruturas e teores das mineralizações. Os dados geofísicos foram exportados do *Oasis* como arquivos do tipo *raster* (dados matriciais), no formato de imagens *TIFF*, já georreferenciados, em que cada *pixel* destas imagens possuem um valor de radiação o campo magnético associado. Os dados cartográficos apresentam-se tanto na forma vetorial, no caso da malha hidrográfica, quanto matricial no caso do modelo digital de terreno (MDT). Desta forma, como os dados estão georreferenciados e no mesmo sistema de projeção (WGS 1984 Zona 22S), foi possível estabelecer uma relação entre informações geológicas, geomorfológicas e geofísicas, e assim associar determinado valor de campo magnético ou emissão radiométrica a uma feição geológica ou geomorfológica, como uma estrutura, litotipo ou ocorrência mineral.

2.1.5. Interpretação e Integração

Após a etapa de processamento dos dados geofísicos e construção do SIG, foi realizada a integração da geologia com a geofísica e interpretação das anomalias magnéticas e radiométricas, através da definição dos domínios e lineamentos magnéticos e gamaespectrométricos e análise dos sinais em relação ao arcaboço geológico. Os domínios foram definidos a partir da identificação de padrões na distribuição das anomalias magnéticas e radiométricas, e dessa forma agrupou-se respostas similares, de acordo com os valores de magnetometria ou gamaespectrometria, para então identificar relações, em especial com as unidades geológicas. Para o traçado dos lineamentos magnéticos e gamaespectrométricos, buscou-se identificar valores que estejam acompanhando uma mesma direção, formando alinhamentos. Desta forma são definidos grupos de lineamentos, que podem ser separados de acordo com suas direções preferencias, e geralmente estão mais associados a estruturas.

2.1.6. Definição das Zonas de Favorabilidade

A definição de zonas favoráveis para a ocorrência de ouro foi realizada através do método de análise espacial dirigida pelo conhecimento (*knowledge driven*), que utiliza a lógica booleana, através do método *Index Overlay*. Este método baseia-se na análise dos dados a partir de um conhecimento prévio do contexto onde é aplicado, que no caso consiste no conhecimento do tipo de depósito e seu sistema mineralizador, e desta forma utiliza-se o método *Index Overlay*, que fundamenta-se na sobreposição de variáveis relacionadas às ocorrências, classificadas de forma binária (como *favorável* e *não favorável*) e com pesos atribuídos de acordo com a relevância para o modelo, onde são aplicadas operações de soma ou subtração. Apesar de ser uma análise de informações simplificadas, este método pode apresentar resultados interessantes para pesquisa mineral (Nóbrega, 2001; Bonham-Carter, 1994 *apud* Nobrega 2001).

As variáveis aplicadas na definição das zonas de favorabilidade foram estabelecidas com base no modelo dos depósitos auríferos primários, que são ou do tipo hidrotermal magmático ou vulcânico exalativo, com influência de zonas de cisalhamento. Desta forma, utilizou-se as unidades geológicas, estruturas, anomalias magnéticas, anomalias gamaespectrométricas e mineralizações já conhecidas para a determinação de áreas favoráveis, que foram classificadas de forma binária, como *favoráveis* e *não favoráveis* com pesos atribuídos de acordo com a relevância para Au primário. No fator Unidades Geológicas, foram consideradas as unidades de composição granítica, as zonas de metamorfismo de contato e a unidade metavulcano-exalativa, além de uma zona de influência de 500 metros como favoráveis, com peso 1. Dentre as estruturas, foram consideradas as falhas, fraturas e zonas de cisalhamento, mais 500 metros de zona de influência, com peso 3 para as estruturas NE, e peso 2 para as estruturas NW. Para as anomalias magnéticas, foram considerados valores igual a 0 do mapa da Inclinação do Sinal Analítico (ISA), que indica a borda

das estruturas, com peso 3. Para as anomalias gamaespectrométricas, foram selecionados valores acima da média mais um desvio padrão ($\bar{x} + S$) para o Kd e Parâmetro F, ambas com peso 2, e por fim, para as ocorrências já conhecidas, foi definida uma zona de 500 metros de influência, com peso variável de acordo com a classificação da mineralização em ocorrência mineral (peso 2) ou jazida (Peso 3). A determinação das anomalias geofísicas foi feita com base na observação dos valores mais relevantes, enquanto que os pesos foram atribuídos com base na influência que estes fatores apresentam na ocorrência das mineralizações. Com isso, a fórmula para a definição das zonas de favorabilidade se dá da seguinte forma:

$$ZF = [geo] + [3 \times (estrutNE)] + [2 \times (estrutNW)] + [3 \times (ISA)] + [2 \times (PF)] + [2 \times (Kd)] + [2 \times OC] + [3 \times JAZ]$$

Onde:

ZF: Zona de Favorabilidade

geo: Unidade Geológica

estrutNE: Estruturas NE

estrutNW: Estruturas NW

ISA: Valores da Inclinação do Sinal Analítico

PF: Parâmetro F

Kd: Potássio Anômalo

OC: Ocorrências Minerais

JAZ: Jazidas

3. CONTEXTO GEOLÓGICO E TECTÔNICO

O contexto geológico e tectônico da área de estudo pode ser abordado em duas fases distintas: a evolução das unidades pré-cambrianas durante o Neoproterozoico, com o desenvolvimento do Cinturão Dom Feliciano durante a Orogenia Brasileira e Rio Doce, e, em menor escala, os processos mesozoicos relacionados ao rifteamento que resultou na abertura do Atlântico Sul (e.g. Basei, 1985, 2000; Castro *et al* 2003; Basei *et al.*, 2010).

A porção leste de Santa Catarina é constituída por unidades pré-cambrianas pertencentes ao Cinturão Dom Feliciano, que é configurado como uma faixa de 1200 km de extensão e largura média de 150 km (Basei, 2000). O Cinturão Dom Feliciano é dividido em três principais segmentos: **(a)** uma faixa granítica a sudeste (Batólito de Florianópolis) composto por granitoides cálcio-alcalinos a alcalinos; **(b)** um cinturão de xistos central (Complexo Metamórfico Brusque) formado por rochas metavulcanossedimentares metamorfizadas nas fácies xisto verde

e anfibolito, onde uma série de corpos graníticos das suítes Valsungana, Nova Trento e São João Batista foram alojados; e **(c)** uma bacia tipo *foreland* a noroeste (Grupo Itajaí), constituída por rochas sedimentares e vulcânicas (Basei *et al.* 2010).

O Cinturão Dom Feliciano formou-se como resultado de consecutivas colisões relacionadas ao amalgamento de terrenos formados e retrabalhados no Proterozoico e início do Cambriano, durante as orogêneses Brasileira e Rio Doce, e que consolidaram a formação de Gondwana Ocidental (Basei, 2000). Segundo Wildner *et al.* (2014), a área de estudo está localizada em sua maior parte no Terreno Tijucas, com uma porção a NW no Terreno Luís Alves, separados pela Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP). O Terreno Tijucas é limitado a sul pela Zona de Cisalhamento Major Gercino (ZCMG) e a norte pela ZCIP, e equivale ao Domínio Intermediário de Basei (1985) ou ao cinturão de xistos (*schist belt*) de Basei (2000), enquanto que o Terreno Luís Alves, representado pelo Grupo Itajaí, corresponde ao Domínio Externo (Basei, 1985) ou às Bacias de Ante-País (*Foreland Basins*) de Basei (2000). A **Figura 9** mostra a área de estudo em relação ao contexto geotectônico regional.

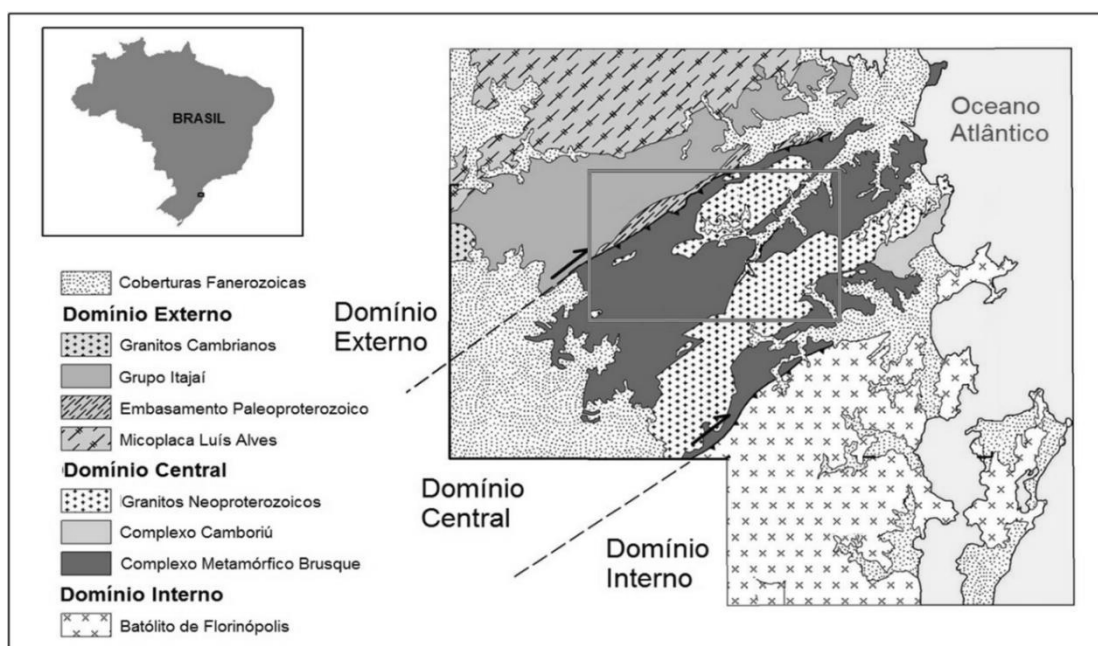


Figura 9: Contexto tectônico da porção nordeste do estado de Santa Catarina, em vermelho, a área de estudo. Adaptado de Basei *et al.* (2011b)

As unidades inseridas no Terreno Tijucas são o Complexo Metamórfico Brusque (CMB), que consiste em uma faixa de rochas metavulcanosedimentares de baixo a médio grau metamórfico; os granitos intrudidos no CMB, compostos pelas suítes Valsungana, Nova Trento e São João Batista, formados em uma fase *sin a tardí* tectônica e, junto à Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP), encontra-se uma faixa de migmatitos e gnaisses paleoproterozoicos denominados Complexo Ribeirão da Prata, expostos por cavalgamentos da ZCIP (Basei *et al.*,

2011). À noroeste estão posicionadas as unidades sedimentares do Grupo Itajaí, sobrepostas às rochas do Terreno Luís Alves (Complexo Granulítico Santa Catarina), que se formaram nas fases finais do Ciclo Brasileiro, por processos de subsidência crustal decorrente da carga do Cinturão Dom Feliciano (Rostirolla *et al.* 1992).

Durante o Mesozoico, o evento rifte relacionado à abertura do Oceano Atlântico Sul foi responsável pela reativação de estruturas pretéritas. Este processo de rifteamento está associado a um aquecimento crustal, produzido por uma pluma mantélica (Renne *et al.* 1992). Tal evento distensivo é representado principalmente por diques de composição básica, com orientação preferencial N45W e pequenas intrusões do tipo *stocks*, de composição alcalina (Caldasso, *et al.*, 1995; Castro *et al.* 2003).

3.1. Complexo Ribeirão da Prata

Na região de Botuverá, ocorre uma faixa alongada na direção NE-SW composta por gnaisses félsicos ortoderivados, de composição monzogranítica, e gnaisses máficos, localmente quartzo-feldspáticos, de derivação granulítica, denominada por Caldasso *et al.* (1995) como Faixa Granulítica-Granito-Gnáissica do Perimbó. De acordo com Silva (1991); Schroeder (2006) e Philipp *et al.* (2004), esta unidade pertence ao Complexo Granulítico Santa Catarina, enquanto que o mapa geológico de Santa Catarina (Wildner *et al.* 2014) enquadra estas rochas no Complexo Ribeirão da Prata, pertencente ao conjunto de Complexos Granito-Gnáissicos-Migmatíticos do Terreno Tijucas, e Basei *et al.* (2010b; 2011) as classificam como Complexo São Miguel.

O Complexo Ribeirão da Prata é balizado por um sistema de cavalgamentos e transcorrências pertencentes à Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó, e se caracteriza como parte do embasamento do Cinturão Dom Feliciano exposto por sistemas de cavalgamentos (Caldasso *et al.* 1995; Basei, 2000; Basei *et al.* 2010, 2011). Dados geocronológicos e geoquímicos apontam a formação destas rochas entre 2,1 e 2,2 Ga, no Paleoproterozoico, bem como um complexo desenvolvimento polifásico, com a acreção terrenos TTG's, rochas toleíticas e magmas graníticos (Silva, 2000; Basei, 2000) e retrabalhamento de crosta arqueana decorrente da Orogenia Brasileira (Borba & Lopes, 1983 *apud* Schroeder, 2006).

As imagens a seguir apresentam uma seção geológica do Terreno Tijucas (**Figura 10**) e o mapa geológico da área de estudo (**Figura 11**).

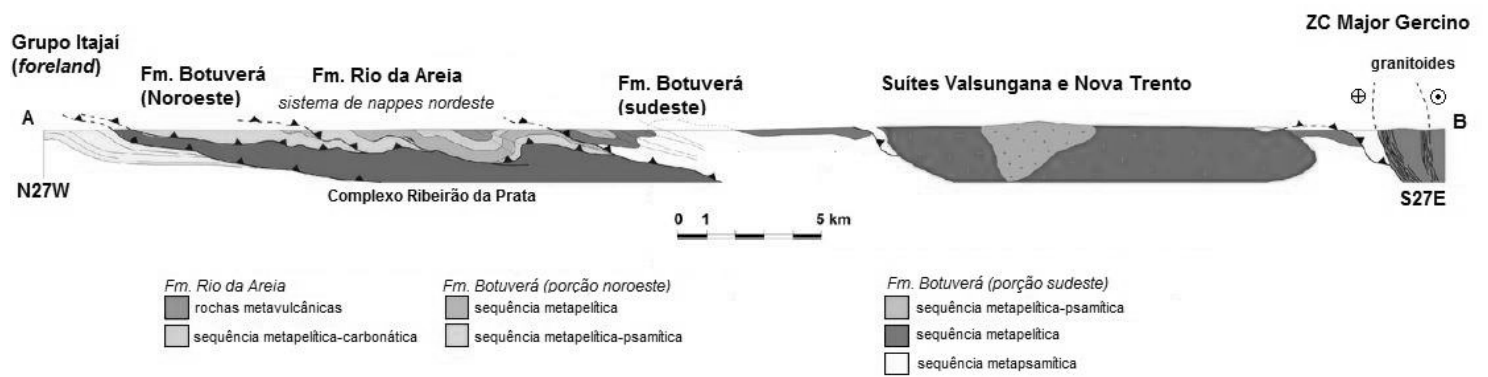


Figura 10: Seção Geológica do Terreno Tijucas e adjacências. Adaptado de Basei et al. 2011.

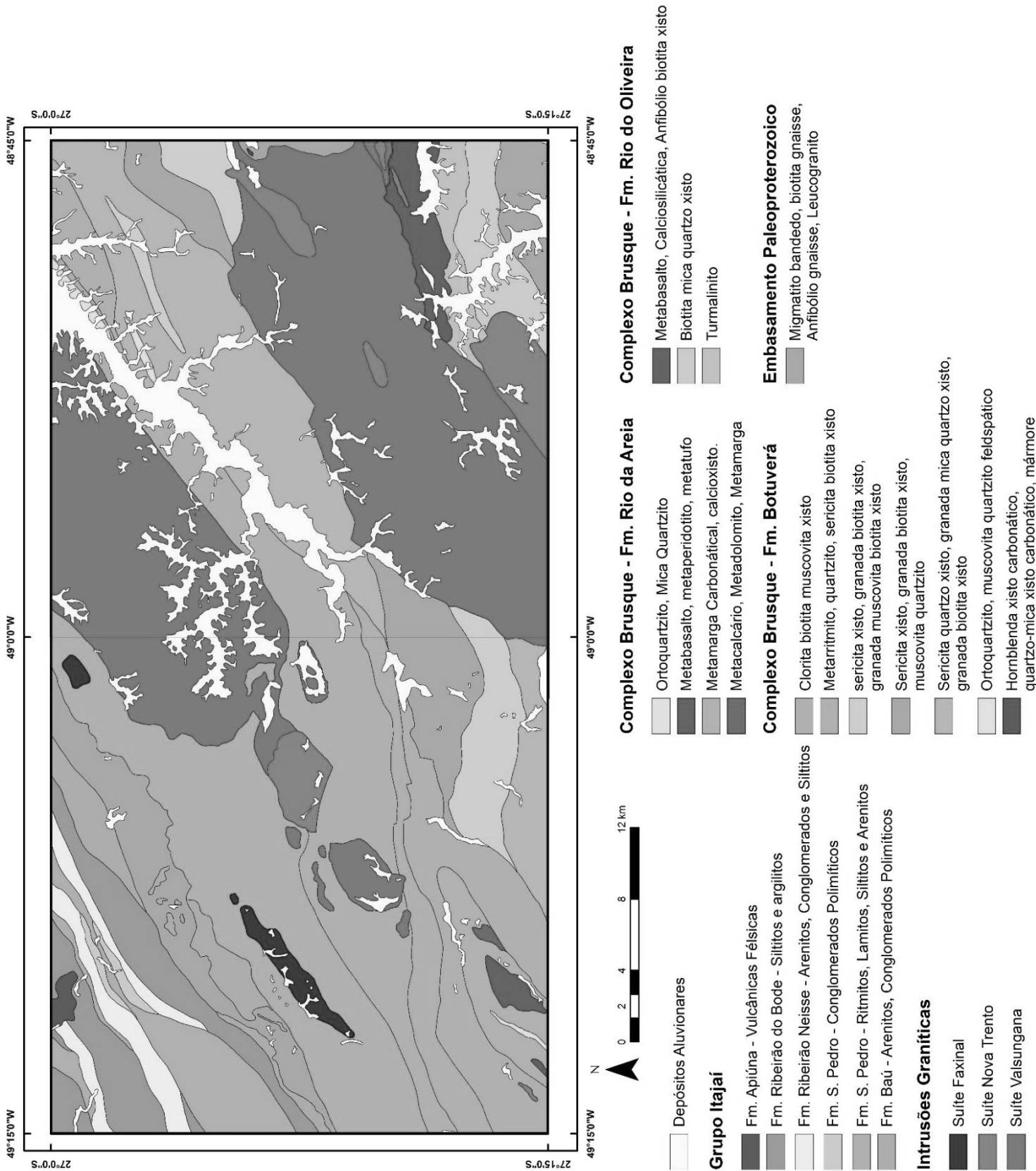


Figura 11: Mapa geológico da área de estudo. Adaptado de CPRM/USP, 2015.

3.2. Complexo Metamórfico Brusque

O Complexo Metamórfico Brusque (CMB) se apresenta como um cinturão de dobramentos com cerca de 40 km de largura, alongado na direção NE-SW, separado em duas porções pelo granito Valsungana e limitado pela ZCMG, a sul e ZCIP, a norte (e.g. Basei, 1985; Silva, 1991; Philipp *et al.* 2004). É composta por metapelitos, metapsamitos, xistos, quartzitos, mármore, rochas cálcio-silicáticas e metabásicas, formadas nas fácies xisto verde à anfibolito. Seus protólitos são interpretados como rochas sedimentares depositadas em ambientes marinhos durante a abertura do Oceano Adamastor (Basei *et al.* 2011 b).

A evolução tectônica desta unidade está relacionada com o Ciclo Brasileiro e a formação do Gondwana Ocidental, no Neoproterozoico, como resultado da interação entre os crátons Rio de La Plata, Paranapanema, Congo e Kalahari, e representa a sequência supracrustal do Cinturão Dom Feliciano (Basei *et al.* 2011 b). De acordo com estudos regionais, seções geológicas e mapeamento na escala 1:100.000 (Basei *et al.* 2006 *apud* Basei *et al.* 2011 b) o CMB divide-se em: Formação Rio da Areia, Formação Botuverá e Formação Rio do Oliveira.

A Formação Rio da Areia compreende as unidades superiores do CMB, e engloba quatro unidades: Metavulcânica - composta por rochas metamáficas a metaultramáficas, como metabasaltos, metaperidotitos e metatufos básicos, frequentemente transformados em clorita xistos e tremolita xistos, com a ocorrência subordinada de rochas metassedimentares intercaladas; Quartzítica - formada por ortoquartzitos maciços, de granulação média, com porções irregulares recristalizadas, camadas de quartzitos micáceos e feldspáticos inseridos na unidade, bem como quartzo-mica xistos e bandas micáceas; Metacarbonática - caracterizada por camadas espessas de mármore calcítico e dolomítico maciços com metamargas e lentes de calcoxistos, além de sericita xistos subordinados; e, por fim, Metapelítica-Carbonática - metamargas, calcoxistos e grande quantidade de lentes de metacalcários e metadolomitos acinzentados, com rochas metapelíticas como sericita xistos, clorita-sericita xistos e quartzo-sericita xistos e metarritmitos intercalados a metapsamitos

A Formação Botuverá compreende principalmente rochas metassedimentares do CMB, e é dividida basicamente em três unidades: Metapelítica - formada por sericita xistos e sericita-clorita xistos com sericita, quartzo e biotita. Ocorrem nas rochas desta unidade microbandamentos caracterizados pela intercalação de bandas sericíticas e quartzíticas, bem como intercalações centimétricas de quartzo xistos e quartzitos; Metaritmítica - envolve filitos rítmicos que gradam para ritmitos com predomínio de psamitos, intercalações de quartzoxistos e quartzo-sericita xistos intercalados a pelitos com *boudins* de quartzo; Metapsamítica - ocorre a nordeste do CMB como dois corpos alongados na direção SW-NE, predominantemente compostos por ortoquartzitos e quartzitos micáceos, com ocorrências locais de sericita quartzitos

com granada e cloritoide. As unidades da Formação Botuverá foram metamorfizadas em médio grau.

Por fim, a Formação Rio do Oliveira, que agrupa principalmente associações metavulcanossedimentares, é caracterizada por quatro unidades orientadas segundo SW-NE: Metapsamítica - representa a porção superior desta formação, sendo composta por ortoquartzitos maciços na base, gradando para ritmitos com intercalações de bandas de sericita-quartzo xisto e quartzito, paraconglomerados polimíticos e formações ferríferas bandadas no topo; Metapelítica - composta predominantemente por micaxistos, e quartzo-mica xistos com granada, biotita e andaluzita. Intercalações de anfibolitos, granada anfibolitos, quartzitos e rochas cálcioossilicáticas são comuns; Metavulcano-Exalativa - formada por turmalinitos intercalados a quartzitos ricos em turmalina e rochas carbonáticas. Os turmalinitos são bandados, com alternância de camadas ricas em turmalina e *chert*. Próximo ao contato com o Granito Valsungana são observadas intercalações metapelíticas compostas por sillimanita-quartzo-mica xistos, contendo localmente andaluzita e cordierita geradas pelo metamorfismo de contato com o granito; Metabásica e Cálcioossilicática - são constituídas por anfibolitos de granulação fina a média, compostas por plagioclásio, minerais opacos e hornblenda, com epidoto e zircão subordinados. Os protólitos destas rochas são interpretados como basaltos, e em menor quantidade, ultramafitos, metamorfizados para tremolita xistos. As rochas cálcioossilicáticas desta unidade foram formadas pelo metamorfismo de rochas carbonáticas e tufos básicos, compostos principalmente por andesina-clorita-sericita-epidoto-quartzo gnaisses e quartzo-clorita-andesina-actinolita gnaisses de granulação fina e textura lepidogranonematoblástica. Os metatufos correspondem à rochas compostas por bandas ricas em plagioclásio e quartzo alternadas por bandas onde predominam hornblenda e camadas compostas por muscovita.

Dados geocronológicos apontam que o CMB teve seu desenvolvimento restrito ao Neoproterozoico, com o início de processos tafrogênicos em 940 Ma, seguido pelo estabelecimento da fase rifte em 840 Ma. O processo de sedimentação cessou há cerca de 640 Ma, quando teve início os eventos tectono-metamórficos polifásicos. Em torno de 600 Ma, o CMB passou por intenso magmatismo sin a tarditectônico, caracterizado pelas suítes graníticas Valsungana, Nova Trento e São João Batista. No fim do Ediacarano, o CMB estabeleceu-se como uma área tectonicamente estável (Basei *et al.* 2011 b).

O CMB compreende a maior parte da área de estudo, sendo representada, segundo Caldasso *et al.* (1995), por cinco unidades distintas: Siliciclástica-Pelítica-Arenosa - composta por metarritmitos pelítico-arenosos e xistos; Siliciclástica Arenosa - constituída por metarenitos e quartzitos micáceos; Carbonática - formada por mármore calcíticos, dolomíticos e margas; Vulcanossedimentar - composta por anfibolitos e metagabros e Areno-Pelítica - composta por ritmitos arenosos, pelítico-arenosos, metarenitos, metaconglomerados e filitos. Em correlação

com Basei *et al.* (2011), a Siliciclástica-Pelítica-Arenosa corresponde às Metapelítica Carbonática da Formação Rio da Areia e às Metapelítica, Metaritmítica e Metapelítica da Formação Botuverá; a unidade Siliciclástica Arenosa é formada por unidades Metapsamíticas das formações Rio da Areia e Rio do Oliveira; a unidade Carbonática correlaciona-se com a unidade Metacarbonática da Formação Rio da Areia; a unidade Vulcanossedimentar está relacionada com a unidade Metavulcânica da Formação Rio da Areia e com as unidades Metavulcânica Exalativa e Metabásica e Calciossilicática da Formação Rio do Oliveira e a Arenopelítica corresponde às unidades metapelíticas e metaritmíticas da Formação Botuverá.

3.3. Intrusões Graníticas

Durante o Ciclo Brasileiro, o Cinturão Dom Feliciano passou por expressiva granitogênese *sin a tarditectônica*, associada a uma segunda fase de deformação, representada na área de estudo pelas suítes graníticas Valsungana, Nova Trento e São João Batista (e.g. Castro, 1997; Basei, 2000, Basei *et al.* 2011 b, Hueck *et al.* 2016). Estes corpos estão intrudidos no CMB, apresentando ocasionalmente relações de contato tectônico, por terem se alojado durante a fase de deformação (Basei, 1985; Basei *et al.* 2011 b). Dados geoquímicos – padrões de elementos terras raras e geoquímica isotópica – indicam uma forte assinatura crustal, que os relaciona às rochas metassedimentares do CMB e do seu embasamento gnáissico. Aparentemente, as três suítes originaram-se no mesmo evento de fusão, porém em diferentes níveis crustais. Enquanto que a Suíte São João Batista formou-se principalmente da fusão dos metassedimentos do CMB, as suítes Valsungana e Nova Trento tem como fonte principal rochas gnáissicas de maior profundidade (Hueck *et al.* 2016). Além da intrusão de corpos graníticos de grande porte, como batólitos e *stocks*, eventos magmáticos *sin* e *pós* colisionais provocaram a intrusão de corpos ígneos tabulares, de composição máfica, alcalina e félsica (Philipp & Campos, 2010; Campos, 2011).

A Suíte Granítica Valsungana (Basei, 1985; Silva, 1991; Basei *et al.* 2011 b) é composta por dois corpos alongados no sentido NE-SW, denominados Valsungana Norte e Valsungana Sul, e por pequenos *stocks* nas bordas destes corpos maiores, designados Lageado Baixo, Lageado Alto e Lageado Mirim. Estas intrusões são compostas por biotita monzogranitos a sienogranitos e granodioritos de granulação grossa, textura porfirítica, com megacristais de FK (Caldasso *et al.* 1995; Wildner *et al.* 2014) e frequentes enclaves e restos de teto de xistos do CMB. Dados litogeoquímicos e geocronológicos apontam que estes granitoides são meta a peraluminosos, tipo “S”, série cálcio-alcalina e o magmatismo tem idade de 620 - 600 Ma (Basei, 1985; Silva, 1991; Basei *et al.* 2011; Hueck *et al.* 2016).

A Suíte Granítica Nova Trento, diferentemente do Granito Valsungana, consiste de pequenos *stocks*, intrudidos no Complexo Metamórfico Brusque e no próprio Granito Valsungana. Estes *stocks*, denominados granitos Guabiruba, Faxinal, Gaspar e Indaiá, são compostos por monzogranitos a sienogranitos equi a inequigranulares finos (Wildner *et al.* 2014), e apresentam enclaves de xistos do CMB e do Granito Valsungana (Basei, 1985). Com base em dados litogeoquímicos, constituem granitos peraluminosos, do tipo “S” e da série cálcio-alcálica, no entanto os corpos Faxinal e Gaspar apresentam uma tendência à série alcalina. Datações indicam que o magmatismo ocorreu há cerca de 600 – 580 Ma (Basei *et al.*, 2011b).

A Suíte Granítica São João Batista é representada na área de estudo pelos granitos Rio da Areia e Tijucas, compostos por *stocks* intrudidos no entorno da Suíte Granítica Valsungana, exibindo contatos intrusivos típicos e ocasionalmente graduais, sugerindo contemporaneidade das intrusões (Basei, 2000; Basei *et al.*, 2011b). Em geral, suas rochas variam entre álcali-feldspato granitos, sienogranitos e monzogranitos leucocráticos a hololeucocráticos equi a inequigranulares de textura fina a média (Hueck *et al.* 2016). Análises litogeoquímicas sugerem composição peraluminosa, série cálcio-alcálica, do tipo “S”. Datações indicam 610 Ma como a idade de formação destas rochas (Hueck *et al.* 2016) (**Figura 12**).

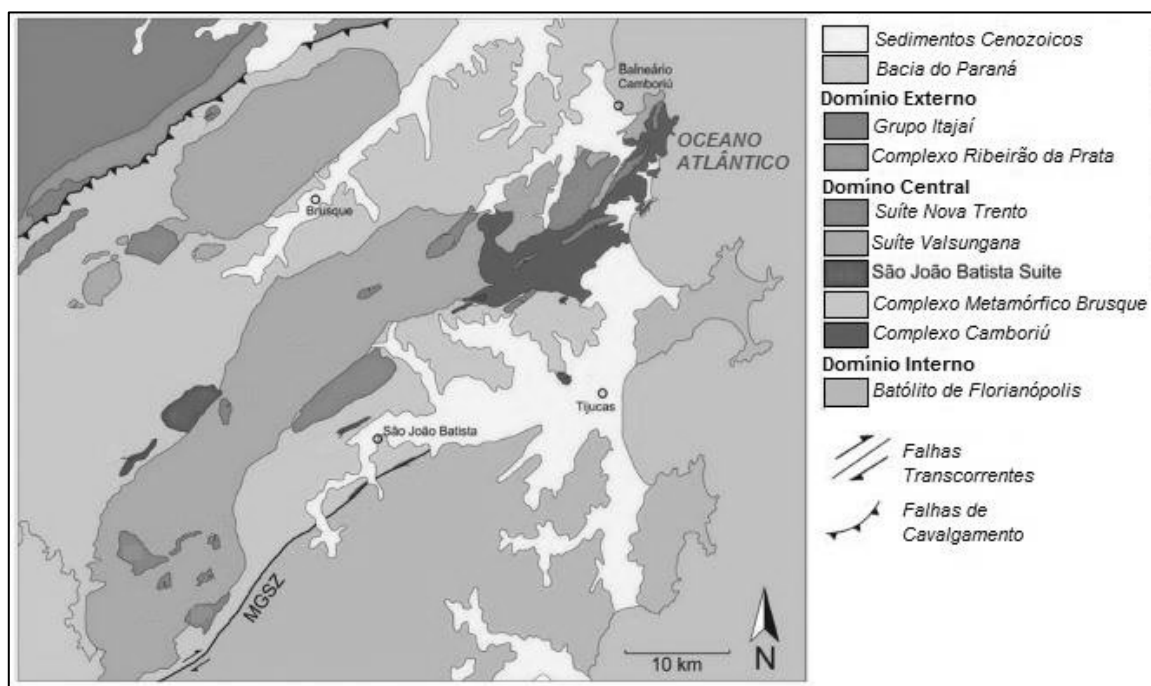


Figura 12: Contexto geotectônico, com detalhe para as suítes graníticas. Adaptado de Hueck *et al.* 2016.

Caldasso *et al.* (1995) propuseram para a área de estudo duas suítes granitoides: Valsungana-Guabiruba e Faxinal. A Suíte Valsungana-Guabiruba é dividida em três fácies: Valsungana, Indaiá e Guabiruba. Nesta classificação, feita com base em descrição macroscópica, os granitos Valsungana Norte, Valsungana Sul, Lageado Baixo, Lageado Alto e

Lageado Mirim pertencem à Suíte Valsungana-Guabiruba, Fácies Valsungana. Já os granitos Guabiruba, Gaspar e Indaiá pertencem à Fácies Guabiruba, enquanto os granitos Rio da Areia e Tijucas compõem a Fácies Indaiá. O Granito Faxinal, considerado de idade eopaleozoica, pertence a outra suíte magmática.

3.4. Grupo Itajaí

O Grupo Itajaí é formado por uma sequência sedimentar depositada em uma bacia alongada na direção ENE-WSW, com cerca de 1.100 km², do tipo *foreland*, originada no Neoproterozoico durante a Orogenia Brasileira, em decorrência de subsidência crustal provocada pela sobrecarga do Cinturão Dom Feliciano (Rostirolla *et al.* 1992 a; Schroeder, 2006; Basei *et al.*, 2011 a; Costa & Nascimento, 2015). O Grupo Itajaí faz contato com as rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina, a norte, e com o CMB e o Complexo Ribeirão da Prata, a sul. Com base em dados geocronológicos (Basei, 1985; Basei *et al.*, 2011 a), a sedimentação deste grupos restringe-se ao Neoproterozoico, com início da sedimentação em torno de 600 Ma e final em 560 Ma. O magmatismo e a deformação se estenderam até no máximo 40 Ma após a sedimentação.

O Grupo Itajaí é composto, da base para o topo, por conglomerados e arenitos de leques aluviais, arenitos sigmoidais de deltas, arenitos fluviais, ritmitos, turbiditos e depósitos pelíticos marinhos profundos. Intercalados a estes depósitos, encontram-se camadas de tufos, bem como riolitos e granitos que cortam as unidades sedimentares (Schroeder, 2006). Rostirolla *et al.* (1992 a) individualizou quatro associações faciológicas, com base na análise estratigráfica: A, formada por sistemas aluviais e plataformais; B, correspondente a sistemas turbidíticos; C, representada por pelitos marinhos profundos e D, composta por leques deltaicos. Basei *et al.* (2011 a) propõem a divisão do Grupo Itajaí em cinco formações: Baú, correspondente aos arenitos e conglomerados de leques aluviais na base da bacia; Ribeirão Carvalho, constituída por turbiditos ritmíticos siltico-argilosos; Rio Neisse, formada por arenitos arcoseanos e siltitos, Ribeirão do Bode, composta por turbiditos siltosos distais e Apiúna, unidade vulcânica representada por rochas félsicas intrudidas nas demais unidades sedimentares (**Figura 13**).

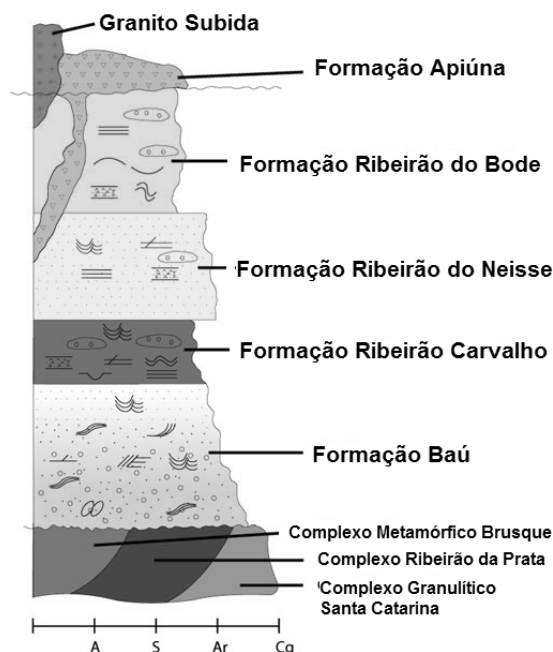


Figura 13: Coluna estratigráfica da Bacia do Itajaí. Adaptado de Basei et al. 2011 a.

Costa & Nascimento (2015), através da análise faciológica e estratigráfica das unidades sedimentares do Grupo Itajaí, propuseram uma divisão da sequência sedimentar em sete associações de fácies distribuídas em três sistemas deposicionais: Continental, composto pelas associações de leques aluviais e conglomerados de rios cascalhosos (AF7) e fluviais de canais entrelaçados (AF6); Marinho raso, que engloba as associações de planícies deltaicas e canais fluviais entrelaçados (AF5) e frente deltaica-prodelta (AF4); e, por fim, Marinho de Águas Profundas, abrangendo as associações de lobos turbidíticos distais (AF3), lobos turbidíticos frontais (AF2) e canais distributários de leques submarinos (AF1).

Caldasso et al. (1995) mapearam seis unidades no Grupo Itajaí: Indivisa, representada por conglomerados, arcóseos e pelitos deformados devido à proximidade com a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó; Conglomerados de Leque Deltaico, que corresponde à Associação A, de Rotirolla et al. (1992 a), à Formação Baú, de Basei et al. (2011 a) e à associação AF7 de Costa & Nascimento (2015); Arenitos Sigmoidais, equivalente à Associação A; Formação Baú e as associações AF6, AF5 e AF4; Arenitos e Pelitos Tabulares, considerada como a Associação B, à Formação Ribeirão Carvalho e às associações AF3 e AF2; Conglomerados de Leque Submarino, correspondente à Associação D, a Formação Ribeirão do Bode, e à associação AF1; e Pelitos e Arenitos Tabulares, que equivale à Associação B, à Formação Ribeirão Carvalho e às associações AF3 e AF2 (**Figura 14**).

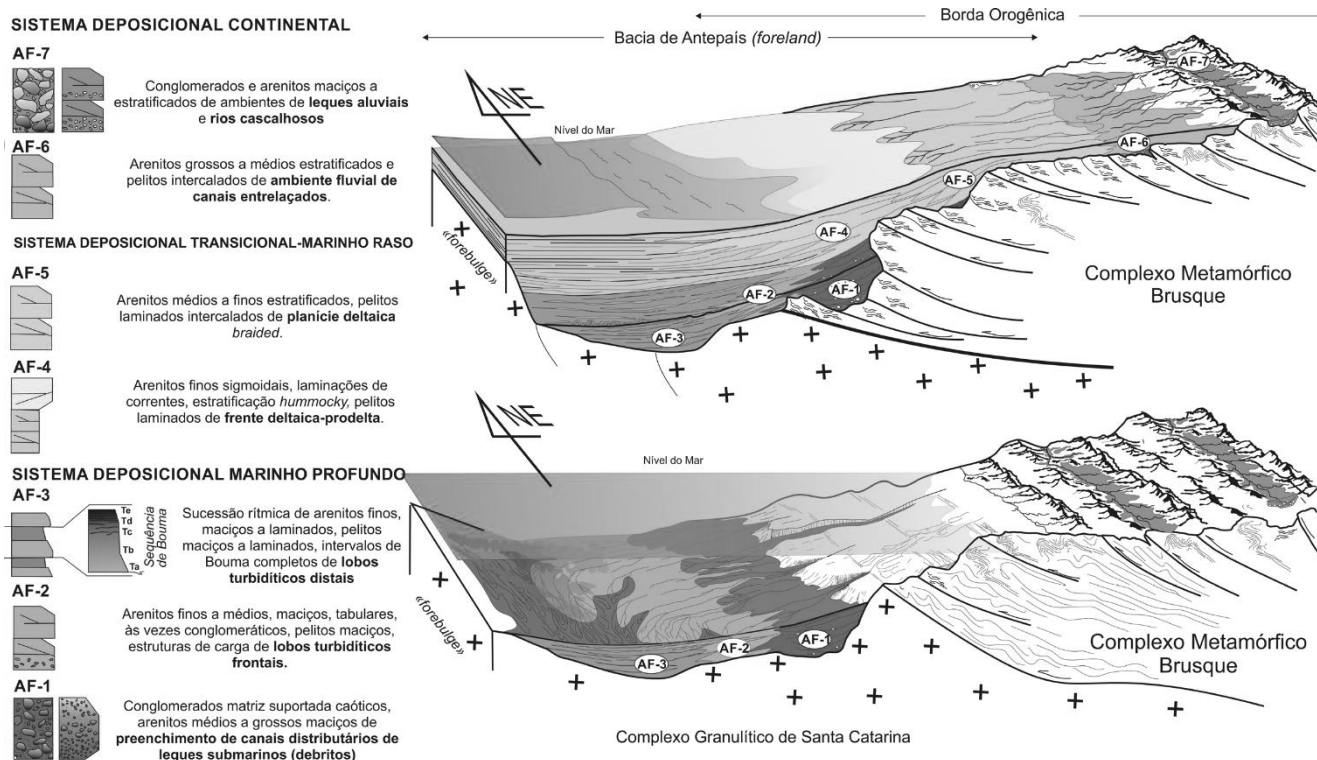


Figura 14: Sistemas deposicionais e associações de fácies da Bacia do Itajaí. Adaptado de Costa & Nascimento (2015).

3.5. Intrusões Mesozoicas

A principal expressão do magmatismo mesozoico são os diques de diabásio, que ocorrem de forma pervasiva na região. Apresentam espessuras e comprimentos variados, no geral de centenas de metros. Estão orientados principalmente na direção NW-SE, e em geral denotam granulação fina a média e textura equigranular hipidiomórfica. Além de diques básicos ocorrem também intrusões alcalinas, especialmente na região sudeste da folha Botuverá, que são expressas na forma de pequenos diques, além de uma pequena intrusão em forma de *stock*, que ocorre no sul, composto essencialmente por traquito (Caldasso *et al.*, 1995).

A intrusão destes diques de diabásio e rochas alcalinas ocorreu no Cretáceo Inferior e está associada à formação de uma megaestrutura denominada Arco de Ponta Grossa, uma flexura crustal que gerou intensa deformação dútil (Conceição *et al.* 1988; Castro *et al.* 2003).

3.6. Depósitos Quaternários

Em geral, os depósitos aluvionares estão restritos à área de influência dos rios que os formaram. Apresentam pequena espessura, em maior parte estão associados ao rio Itajaí-Mirim,

e são compostos por areia e silte. Os depósitos de tálus encontram-se nas encostas e fundos dos vales, e são compostos por blocos de rocha e material inconsolidado. Estes depósitos formaram-se por movimentos gravitacionais e movimentos de massa (Caldasso *et al.* 1995).

3.7. Evolução Tectônica e Aspectos Estruturais

A evolução geotectônica e estrutural da região está relacionada principalmente com o desenvolvimento do Cinturão Dom Feliciano, no Neoproterozoico e Cambriano, durante a Orogenia Brasileira, que através da colisão de diversos terrenos resultou na formação do Gondwana Ocidental (Basei, 2000; Philipp *et al.* 2004; Basei *et al.* 2011b).

Basei (1985; 2000) sugere quatro fases de deformação para o Cinturão Dom Feliciano: a primeira é observável apenas nas unidades do Complexo Metamórfico Brusque; as três subsequentes são Brasileiras, relacionadas a movimentos compressivos em direção ao Cráton Rio de la Plata. A segunda e a terceira apresentaram orientação na direção SW-NE, com vergência para NW. A quarta e última está associada a movimentações transcorrentes desenvolvidas através de lineamentos estruturais pretéritos.

A primeira fase de deformação afetou somente as rochas do Complexo Metamórfico Brusque (CMB), onde é representada pela foliação S_1 , uma estrutura pouco evidente, em geral transposta e intrafoliar às feições geradas pelas segunda e terceira fases. A segunda e terceira fases, mais evidentes, são representadas pela foliação S_2 , uma superfície de transposição que é a principal estrutura das unidades do CMB, com direção NE-SW, dobras fechadas e vergência para NW. A terceira fase é representada pela foliação S_3 , definida pelos planos axiais de grandes dobras antiformes e sinformes, normais e cilíndricas, com planos axiais de direção SW-NE.

Caldasso *et al.* (1995) definiram para a área de estudo três fases deformacionais com cronologia distinta. O evento deformacional mais antigo está registrado apenas nas rochas arqueanas da Faixa Granulítica-Granito-Gnáissica do Perimbó, na forma de foliações miloníticas. O segundo evento de deformação está relacionado a uma tectônica convergente de baixo ângulo, que formou sistemas de cavalgamento e de *nappes*, que afetou, sobretudo, as rochas do Complexo Brusque. Por fim, o conjunto de fases deformacionais mais jovens está associado à tectônica de alto ângulo, expresso por um importante evento de transcorrências.

Diversas zonas de cisalhamento cortam as rochas da área, tanto zonas de baixo ângulo quanto de alto, e entre estas podemos destacar a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP), um conjunto de cavalgamentos e transcorrências que separa as unidades do Terreno Tijucas e do Terreno Luís Alves, e expôs as rochas paleoproterozoicas do Complexo Ribeirão da Prata (Basei, 1985, 2000; Caldasso *et al.*, 1995).

Outras importantes zonas de cisalhamento também ocorrem, em geral de alto ângulo ou zonas de baixo ângulo afetadas por estruturas verticais a subverticais. Dentre estas, podemos destacar as zonas de cisalhamento Lageado Carneiro Branco, que separa as porções mais quartzosas e xistosas da unidade Siliciclástica Pelítica Arenosa, a Z.C. Águas Cristalinas, estrutura EW fortemente flexionada, a Z.C. Braço Cristalino, que tem grande influência sobre as mineralizações e a Z.C. Itajaí-Mirim, que secciona a área no sentido SW-NE (Biondi *et al.*, 2007).

3.8. Metalogenia

Diversas ocorrências minerais foram reconhecidas e descritas na área, caracterizadas principalmente por serem do tipo filoneano hidrotermal, associadas à zonas cisalhamento, aos granitos ou ambos (Biondi *et al.* 1992; Caldasso *et al.* 1995; Castro, 1997, Castro *et al.*, 1999; Biondi *et al.* 2007). Entre estas, estão presentes mineralizações em chumbo e zinco (Pb/Zn), Estanho (Sn), Tungstênio (W), Urânio/Tório (U/Th) e Ouro (Au). Além das ocorrências em veios, também é encontrado ouro, cassiterita, scheelita e wolframita em aluviões (Caldasso *et al.*, 1995). Por constituírem o objetivo principal deste trabalho, as mineralizações auríferas serão abordadas com maior enfoque.

Caldasso *et al.* (1995) descrevem ocorrências de ouro associadas a filões de quartzo e pequenas concentrações de óxidos de ferro, pirita, calcopirita e galena e, às vezes, prata. Em geral, estes veios apresentam direção preferencial NE-SW, e estão situados nas periferias dos corpos graníticos, intrudidos nas rochas do Complexo Brusque. Também ocorrem mineralizações de ouro associadas a tungstênio, igualmente filoneanas. As principais ocorrências de ouro na região são conhecidas como Carneiro Branco, Cavalo Branco, Braço da Cristalina, Tigrano, Ribeirão do Russo e Fanuelsson, todas caracterizadas por filões de quartzo e sulfetos. Essas mineralizações ocorrem principalmente na região de Botuverá, enquanto que na Folha Brusque duas ocorrências interpretadas como do tipo vulcanogênicas localizam-se na sua porção sudeste, e estão alojadas em sequência metavulcanossedimentar composta por rochas cálcio-silicáticas, metabásicas e metaultrabásicas, quartzo-turmalinitos (interpretados como exalitos), biotita-quartzo xistos, meta-ácidas, metatufos, níveis de quartzo-turmalinitos com sulfetos (pirita) disseminados e lentes de quartzo ricas em pirita e arsenopirita.

Toniolo & Kirchner (*apud* Castro, 1997), apontam as regiões Gaspar, Botuverá e Canelinha como as principais ocorrências de Au em Santa Catarina. Em Botuverá a mineralização ocorre como filões de quartzo com Au e pirita disseminados, com direção principal EW e rochas encaixantes como quartzitos micáceos, xistos e filitos, e granitóides. Em relação às concentrações de Au na região, esta possui considerável expressão, uma vez que na década de

80 cerca de 4.500 toneladas de minério foram lavradas nos veios Carneiro Branco e Cristalina, com teores médios de 6 a 9 g/t de Au e 3,5 g/t de Ag.

Na região de Canelinha (Folha Brusque), concentrações de Au associadas a sulfetos disseminados ou maciços (pirita, pirrotita e calcopirita) ocorrem em lentes de até 10 cm de espessura, concordantes com rochas quartzo-turmalínicas bandadas, cálcio-silicáticas e metabásicas. Os teores de Au atingem 0,18 ppm, ocorrendo ainda Ag (até 1,6ppm) e Bi (192ppm) (Castro 1997) e equivalem aos veios vulcanogênicos de Caldasso *et al.* (1995).

Biondi *et al.* (2007), ao estudarem a geologia do depósito do Cavalo Branco, estimaram que as ocorrências do Cavalo Branco, Braço da Cristalina e Ribeirão do Russo encerrem entre 1.000 e 2.000 kg de ouro (**Figura 15**). Este trabalho discute a evolução e gênese destas ocorrências como relacionadas a corpos plutônicos, devido à formação de zonas de alteração hidrotermal potássica, fílica e propílica, com posterior reativação de sistemas de falhas transcorrentes, que cisalharam em parte os corpos mineralizados, modificando suas geometrias. Dados geoquímicos e de teores sugerem que houve interação do fluido mesotermal, gerada pela reativação das estruturas, que remobilizou os sulfetos, porém não alterou de forma incisiva a composição das mineralizações, mantendo a classificação dos depósitos como sendo do tipo plutônico.

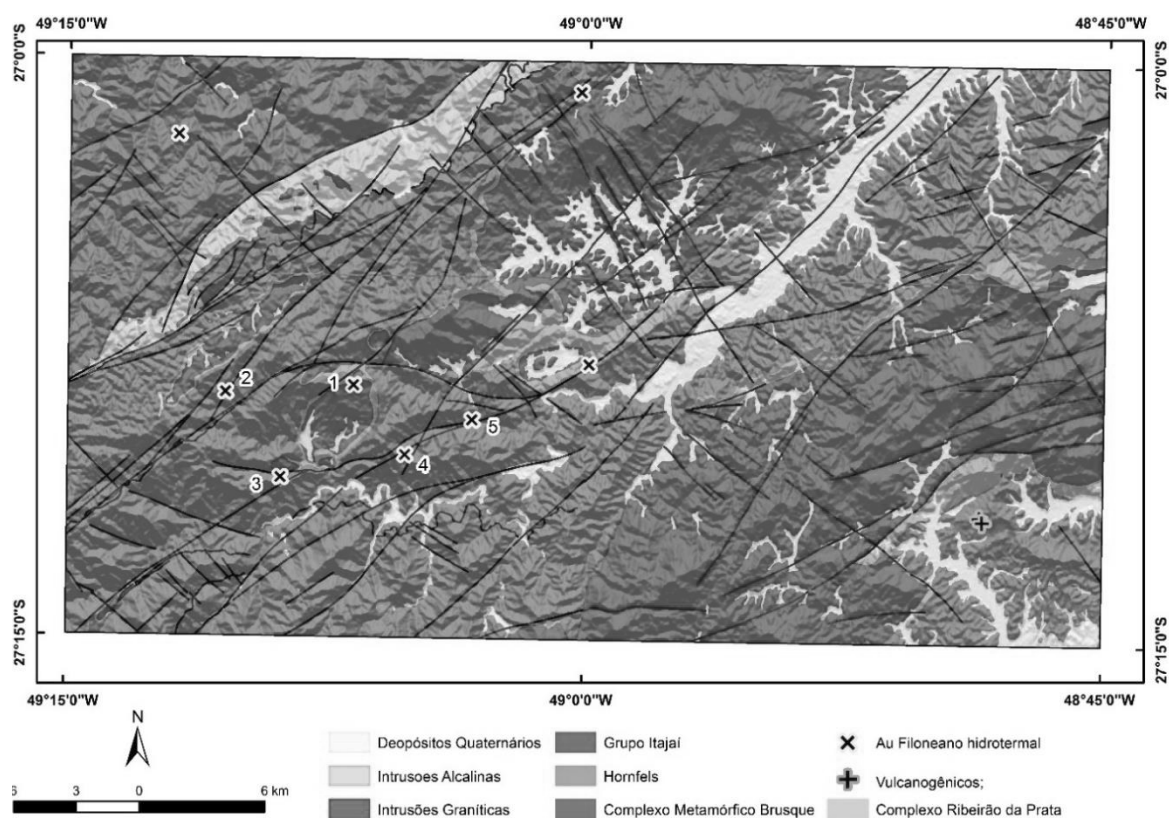


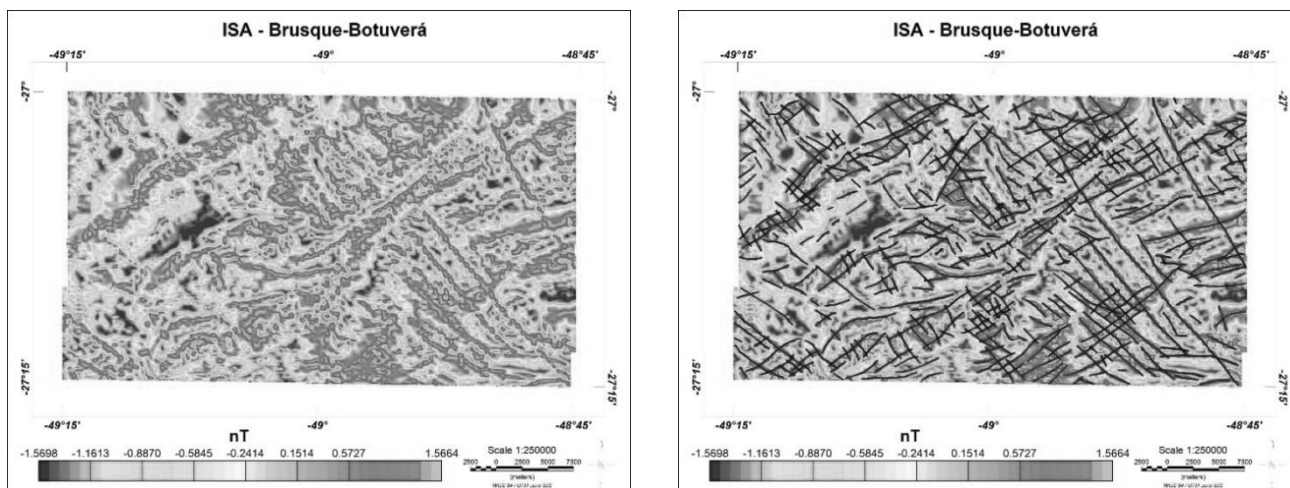
Figura 15: Geologia simplificada da área, com as principais ocorrências de ouro primário. (1) Carneiro Branco, (2) Fanuelsson, (3) Tigrano, (4) Ribeirão do Russo, (5) Braço da Cristalina. Adaptado de Caldasso *et al.* 1995.

4. RESULTADOS

A discussão dos resultados baseou-se na interpretação dos dados magnetométricos e radiométricos processados e sua integração com dados geológicos e estruturais. A magnetometria foi aplicada principalmente na delimitação do arcabouço magnético-estrutural, através da determinação dos lineamentos magnéticos, utilizando principalmente os métodos de realce de anomalias. A Gamaespectrometria foi utilizada na interpretação dos litotipos e identificação de zonas de alteração hidrotermal, através da delimitação dos domínios gamaespectrométricos e zonas de potássio e urânio anômalos.

4.1. Magnetometria

Através do processamento dos dados magnetométricos, foram elaborados mapas dos métodos de realces, que alocam as anomalias magnéticas nas bordas e/ou centros das fontes, facilitando sua interpretação. Dos métodos existentes, os aplicados foram a Redução ao Polo (RTP), Gradiente Horizontal Total (GHT), Amplitude do Sinal Analítico (ASA), Inclinação do Sinal Analítico (ISA), Signum Transform, e de segunda derivada; ISA-GHT e GHT-ISA (**Figura 16**).



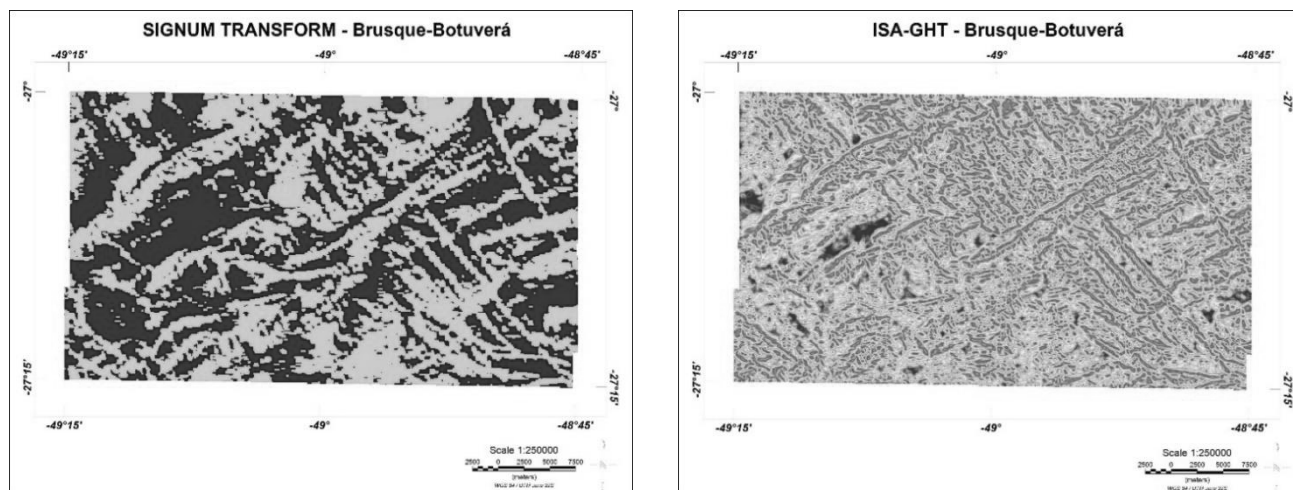


Figura 16: Métodos magnéticos utilizados para a delimitação dos lineamentos.

Com os sinais das anomalias centrados sobre as bordas ou centros dos corpos, lineamentos magnéticos foram traçados e interpretados como estruturas ou rochas susceptíveis, tais como lentes de anfibolitos e diques de diabásio. Com a análise dos lineamentos, foi possível observar três principais *trends* de estruturas: NE, NW e, subordinadamente, EW.

As estruturas NE distribuem-se por toda área, com direções que variam entre N30E a N50E, e concentram-se em três principais zonas: a noroeste, na porção central e a sudeste. O grupo de lineamentos a noroeste está relacionado com as estruturas da ZCIP e às rochas do Complexo Ribeirão da Prata. A ZCIP é marcada por estruturas com caráter dúctil a dúctil-rúptil, tais como milonitos, ultramilonitos e filonitos, com caráter localmente rúptil (Schroeder, 2006). A geometria desta zona de cisalhamento é complexa, com um padrão entrelaçado de cavalgamentos e transcorrências associadas (Biondi *et al.*, 1992; Schroeder, 2006). Os lineamentos magnéticos apresentam um padrão semelhante ao da ZCIP, com lineamentos entrelaçados e paralelos acompanhando o Complexo Ribeirão da Prata e a ZCIP. O grupo central de lineamentos magnéticos NE cruzam toda a sua extensão, de SW a NE, e estão associados a uma série de zonas de cisalhamento de baixo ângulo e a fraturas que se estendem para o Granito Valsungana Norte. Estes cavalgamentos são denominados Zona de Cisalhamento Lageado Carneiro Branco (ZCLCB), Águas Cristalinas (ZCAC) e Lineamento Itajaí-Mirim (LIM), segundo Biondi *et al.* (2007). Estes lineamentos aparentam apresentar uma importante relação com as mineralizações auríferas, pois muitas ocorrências mapeadas localizam-se alinhadas ou próximas aos lineamentos. O grupo a sudeste está relacionado com uma série de estruturas (falhas e/ou fraturas) hospedadas principalmente no Granito Valsungana Sul. Estes lineamentos apresentam uma correlação com lineamentos verificados no MDT, e sugerem a existência de uma zona de cisalhamento.

Os lineamentos EW estão relacionados aos NE, e são menos pervasivos que os demais *trends*, com concentração maior na porção central e sudeste. Apresentam geometria sinuosa, e provavelmente são associados à ZCAC, considerando que os lineamentos coincidem com as estruturas mapeadas. Estes lineamentos aparentam ser inflexões dos lineamentos NE, e também tem relação com as ocorrências auríferas (**Figura 17**).

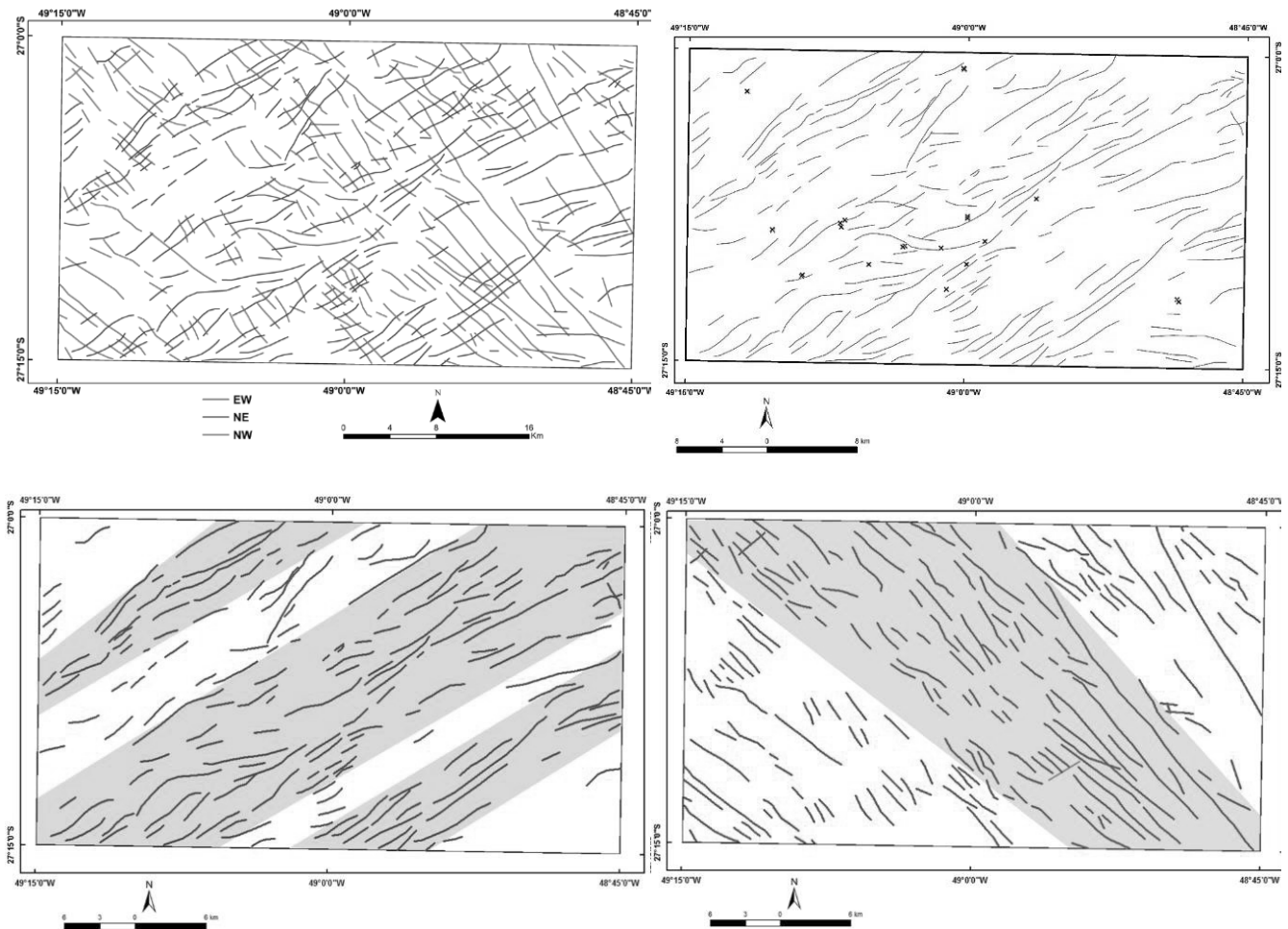


Figura 17. Lineamentos magnéticos e sua distribuição na área de estudo. No canto superior esquerdo, os lineamentos de acordo com sua direção, no canto superior direito, os lineamentos NE e EW com as ocorrências (em amarelo); no inferior esquerdo, os lineamentos NE separados em zonas; no inferior direito, os lineamentos NW.

As estruturas com direção NW, diferentemente das de direção NE, apresentam alguns longos alinhamentos contínuos, e não se distribuem de forma tão evidente em zonas, mas com um espalhamento mais homogêneo pela área, no entanto é possível identificar na região central uma maior densidade desses lineamentos, com direções preferenciais N30W a N50W. Estes lineamentos magnéticos coincidem com estruturas positivas no MDT, sugerindo uma relação destas anomalias com diques básicos.

A seguir encontram-se os mapas magnéticos processados (**Figura 18**).

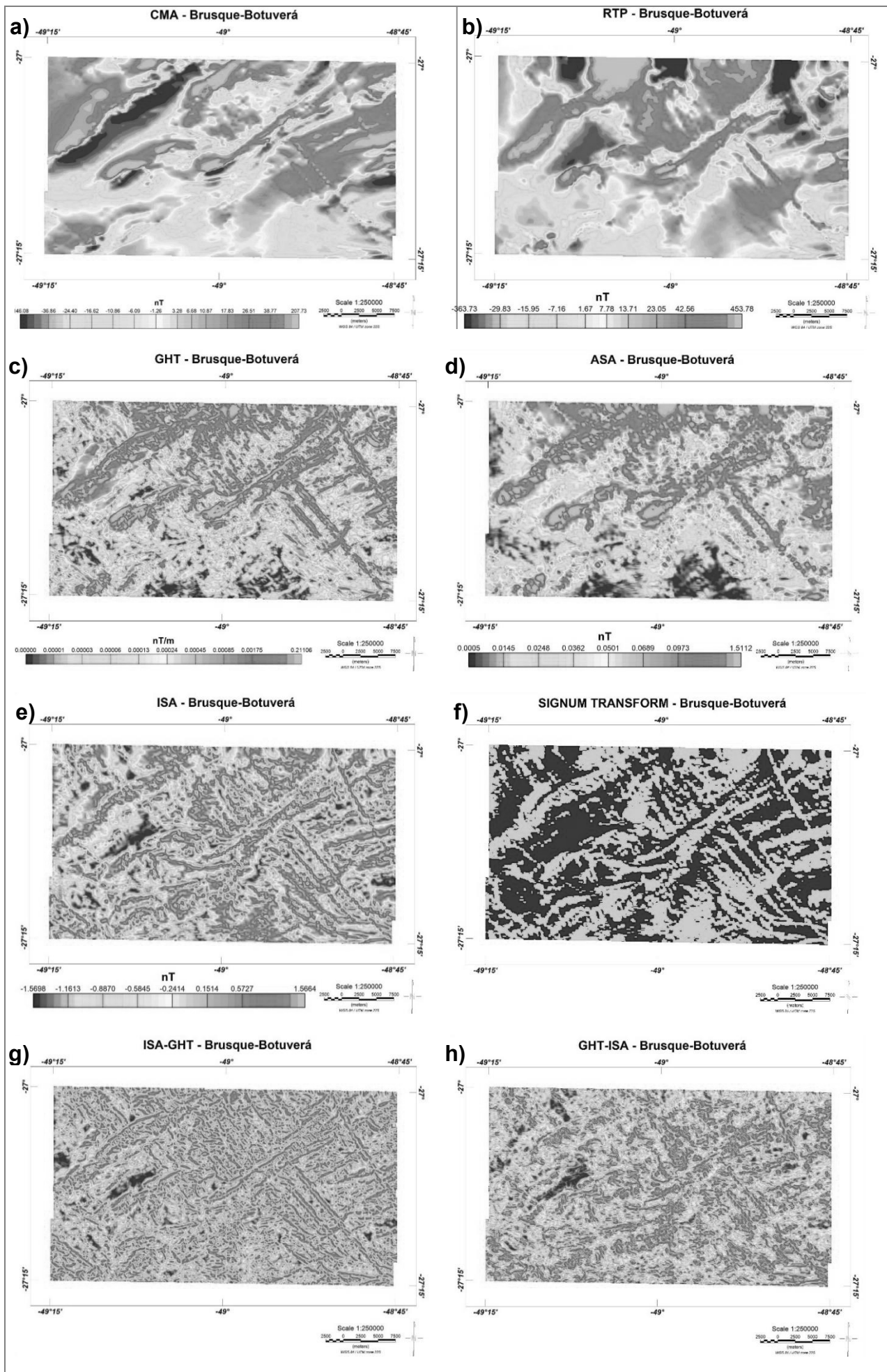


Figura 18: Mapas Magnéticos; (a) Campo Magnético Anômalo; (b) Redução ao Polo; (c) Gradiente Horizontal Total; (d) Amplitude do Sinal Analítico; (e) Inclinação do Sinal Analítico; (f) Signum Transform; (g) ISA-GHT; (h) GHT-ISA.

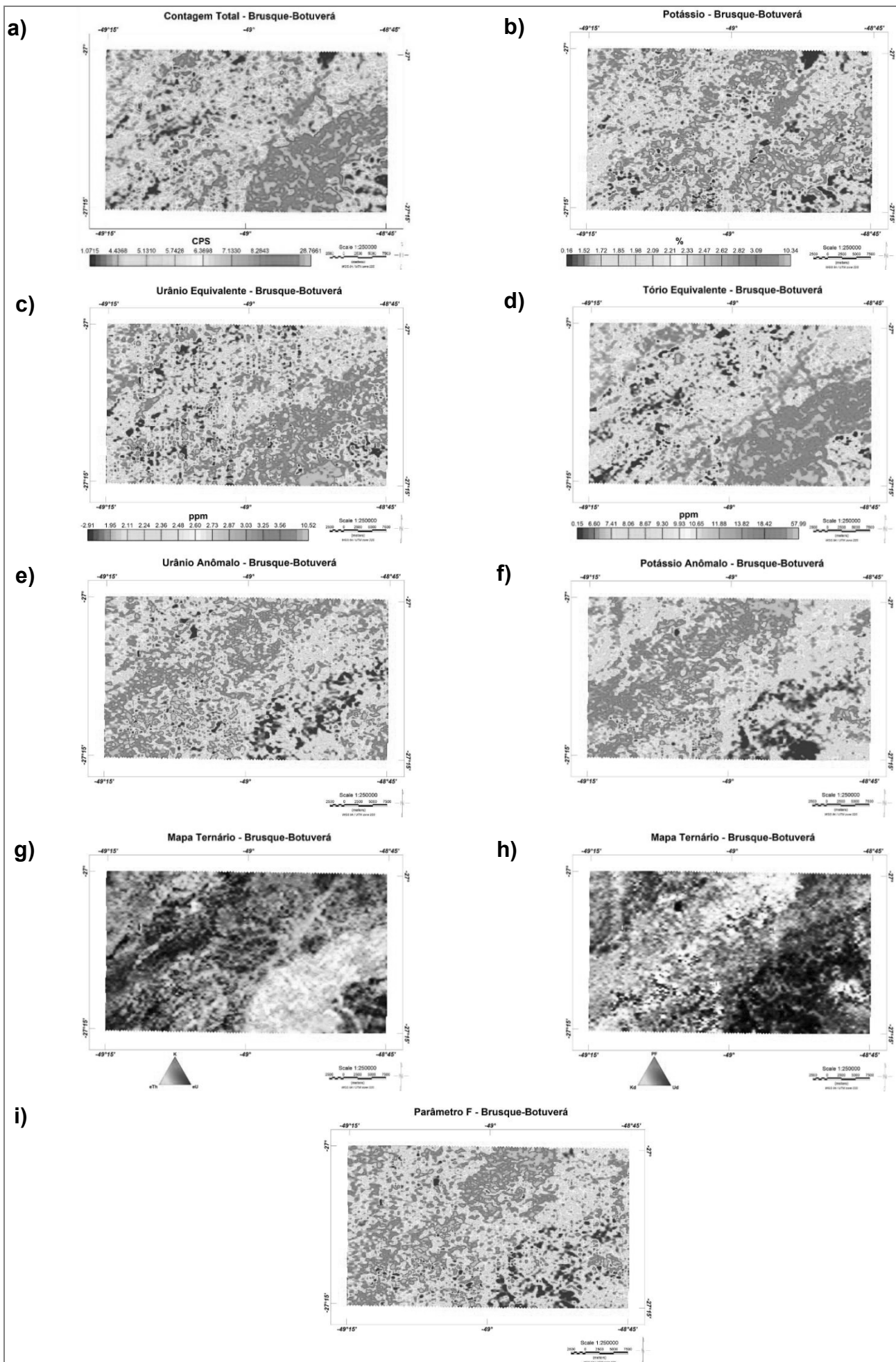


Figura 19: Mapas Gamaespectrométricos; (a) Contagem Total; (b) Potássio; (c) equivalente de Urânio; (d) equivalente de Tório; (e) Ud; (f) Kd; (g) Mapa Ternário K-eTh-eU; (h) Mapa Ternário PF-Kd-Ud e (i) Parâmetro F.

4.2. Gamaespectrometria

Com base na análise dos mapas da Contagem Total, K, U e Th e o mapa ternário K-U-Th, pode-se observar padrões na distribuição destes elementos (**Figura 19**), onde ocorre o enriquecimento de determinados elementos e o empobrecimento dos outros, causado tanto por fatores geológicos endógenos quanto fatores exógenos (Ulbricht *et al.*, 2009; Ribeiro *et al.*, 2013). A partir destes padrões, podem-se relacionar as áreas com comportamento semelhante na distribuição dos elementos radioativos, determinando-se então os domínios gamaespectrométricos. Como critério para a definição dos domínios, foi levado em consideração as concentrações de K, eU e eTh, sendo separados em domínios com alta, média e baixa concentração para cada elemento (**Figura 20**). Com base na identificação dos padrões e análise da distribuição dos elementos, foi possível indentificar cinco domínios gamaespectrométricos para a área, conforme a tabela abaixo.

	K	U	Th
Domínio A	<i>Médio</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>
Domínio B	<i>Médio</i>	<i>Médio</i>	<i>Médio</i>
Domínio C	<i>Alto</i>	<i>Médio</i>	<i>Baixo</i>
Domínio D	<i>Médio</i>	<i>Alto</i>	<i>Baixo</i>
Domínio E	<i>Baixo</i>	<i>Baixo</i>	<i>Baixo</i>

Tabela 1: Domínio Gamaespectrométricos e suas distribuições de elementos.

O domínio A, com valores altos de urânio e tório e médios para potássio corresponde em maior parte ao corpo granítico Valsungana Sul e a um depósito aluvionar a sudeste. Este domínio apresenta uma correlação satisfatória com suas unidades geológicas associadas, provavelmente devido à intrusão ter tido pouca influência de processos hidrotermais. As bordas do domínio e do granito não coincidem perfeitamente, possivelmente devido a fatores geomorfológicos, pois os sinais radiométricos podem estar associados aos solos formados pelo intemperismo das rochas. O granito Valsungana é composto essencialmente por monzogranitos, sienogranitos e granodioritos porfíricos (megacristais de FK), rochas ricas nos elementos potássio, urânio e tório, e, portanto, de fácil identificação pela radiometria (Ferreira *et al.*, 2009). Os depósitos aluvionares da área de estudo, segundo Caldasso *et al.* (1995), são constituídos por sedimentos inconsolidados, tais como argilas depositadas em planícies de inundação e depósitos coluvionares, explicando os teores altos em elementos radioativos.

O domínio B, caracterizado por valores medianos dos três elementos é caracterizado por duas porções: uma localizada a NW, que consiste nas sequências sedimentares do Grupo Itajaí, gnaisses do Complexo Ribeirão da Prata e parte do Granito Faxinal, e parte da região central, onde aflora a Formação Botuverá. Os valores de radioisótopos no Grupo Itajaí estão associados

à arcóseos, ricos em FK, lentes e camadas argilosas e diamictitos (turbiditos), enquanto que no Complexo Ribeirão da Prata a gnaisses félsicos, de composição monzogranítica e gnaisses máficos intercalados a níveis quartzo-feldspáticos, e no Granito Faxinal à sua composição essencialmente alcalina (quartzo sienitos e hornblenda sienitos). Na porção do domínio sobre o Complexo Metamórfico Brusque, as rochas predominantes são filitos, filitos grafitosos, micaxistos e quartzo-micaxistos com granada, que também são abundantes em filossilicatos, onde ocorrem altos teores de Potássio.

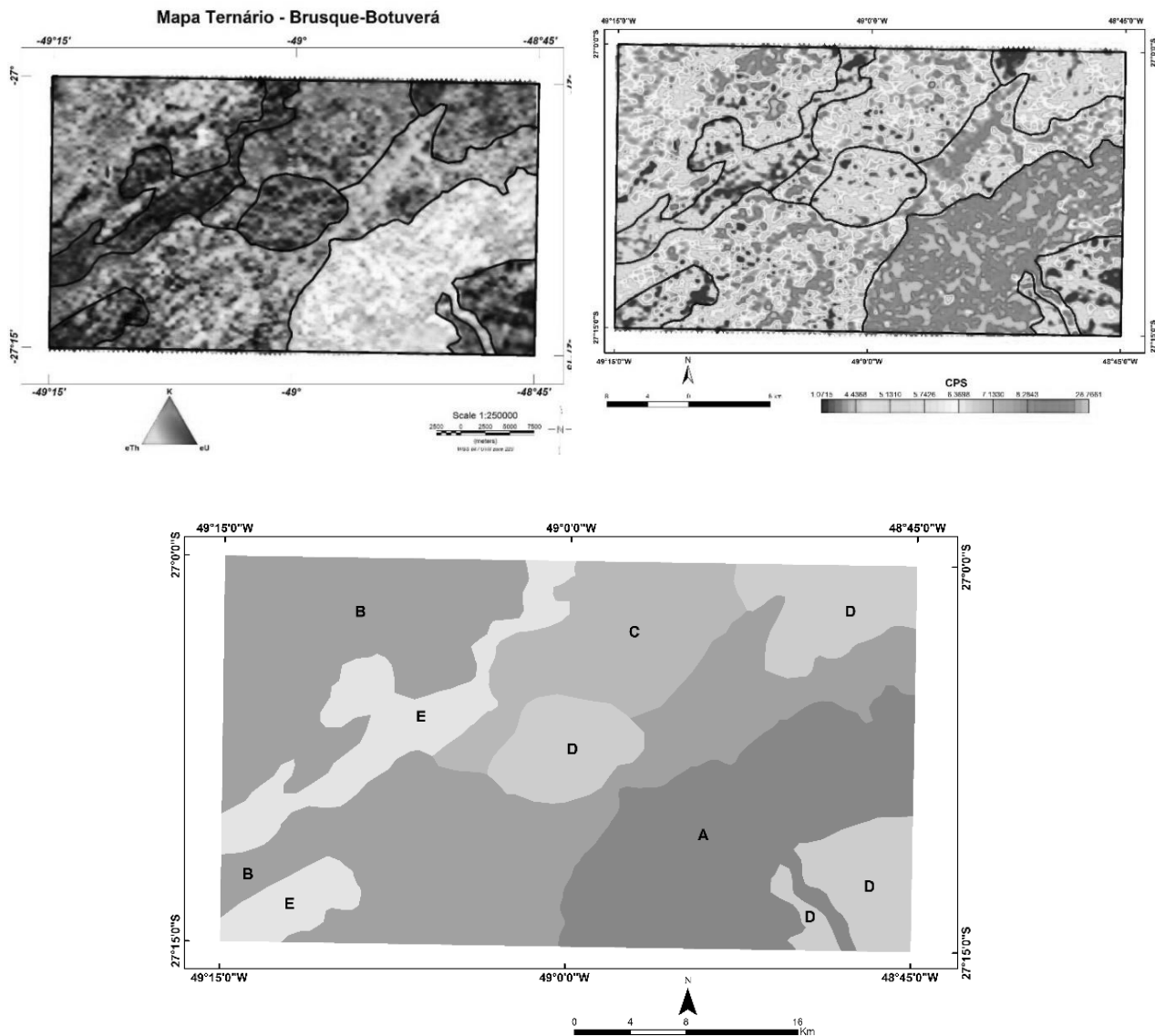


Figura 20. Determinação dos domínios gamaespectrométricos (figura inferior) a partir do mapa ternário (superior esquerdo) e Contagem Total (superior direito).

O domínio C, que possui altos valores de potássio médios de urânio e baixos de tório, está relacionado ao corpo granítico Valsungana norte, que apesar de ser uma intrusão da mesma suíte que o granito Valsungana Sul, apresenta uma resposta diferente, provavelmente devido a processos hidrotermais que incindiram neste plúton, enriquecimento-o em potássio. De acordo

com Biondi *et al.* (2007), os processos hidrotermais que geraram os depósitos de ouro formaram zonas de alteração potássica, fílica e propílica, ricas em minerais de composição potássica, o que possivelmente resultou nas anomalias radiométricas.

O domínio D, constituído por teores medianos de potássio, altos de urânio e baixos de tório ocorre em três regiões: uma bem ao centro da área, que engloba parte do Complexo Brusque, em especial unidades metamorizadas pelos granitos e os próprios granitos em si, parcialmente o Valsungana Norte e completamente o granito Lageado Baixo; outra região encontra-se no extremo nordeste, associada à unidade Metassedimentar da Formação Botuverá e uma pequena parte do granito Valsungana Norte, e a terceira a sudeste, abrangendo parte das unidades Metabásica e Calciossilicáica e Metavulcânica-exalativa da Formação Rio do Oliveira, bem como uma porção do granito Valsungana Sul. Diferente dos demais domínios, este não possui geometria que acompanha as unidades geológicas e litotipos, apresenta formas irregulares, aproximadamente arredondadas, presumivelmente relacionado também a processos hidrotermais, que mobilizaram os elementos. Esta hipótese é favorecida pela proximidade ou inserção de rochas como granitos e *hornfels* neste domínio. A **Figura 21** mostra os domínios gamaespectrométricos e sua correlação com a geologia.

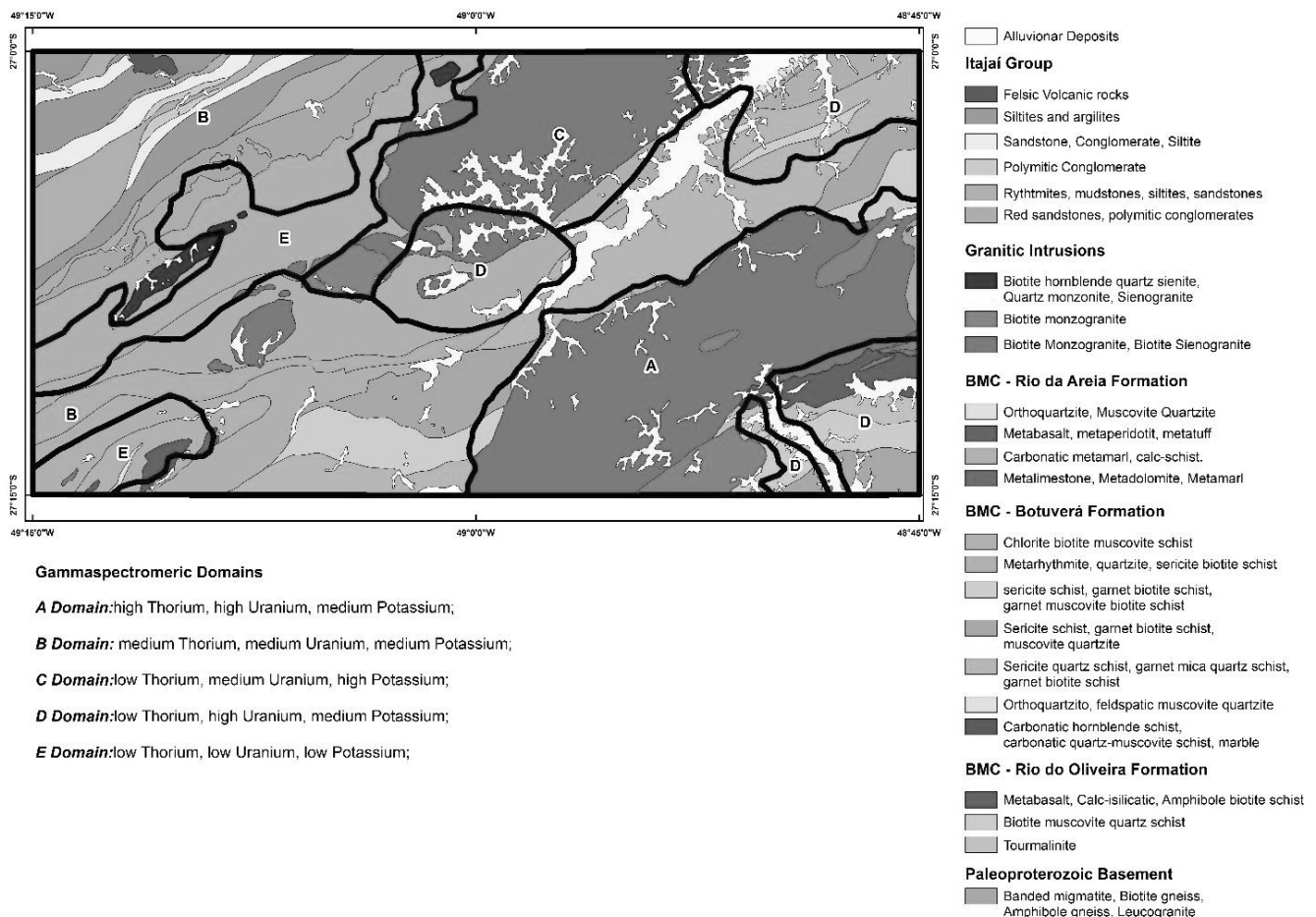


Figura 21. Correlação dos domínios gamaespectrométricos com geologia.

O domínio E, que é o mais depletado em elementos radioativos, com baixos teores em potássio, urânio e tório, é representado por duas partes: uma faixa alongada no sentido SW-NE, com contatos “interdigitados” com parte do domínio B e uma porção a sudoeste, de forma aproximadamente elipsoide. A primeira porção do domínio E está associada a duas unidades basicamente: à unidade Metapsamítica das formações Rio da Areia e Rio do Oliveira, composta por quartzo-filitos, filitos, quartzitos micáceos e metaconglomerados. Os fracos sinais estão muito provavelmente relacionados com os teores de metapsamitos, ricos em quartzo. A outra porção engloba a maior parte da Formação Rio da Areia, constituídas por metagabros, metabasaltos e xistos magnesianos e calcários calcíticos, dolomíticos, margas, respectivamente. Em geral, rochas carbonáticas e máficas/ultamáficas são pobres nos elementos potássio, urânio e tório.

Através dos mapas gamaespectrométricos, foi possível observar anomalias radiométricas alinhadas (**Figura 22**), formando lineamentos com direções preferenciais, de forma análoga aos lineamentos magnéticos. Muitos destes lineamentos e alinhamentos gamaespectrométricos estão associadas a estruturas, que remobilizam elementos radioativos. Assim foi possível analisar os lineamentos gamaespectrométricos como método auxiliar de análise estrutural. Para traçá-los, foram aplicados os métodos derivados, Parâmetro F (PF), Potássio Anômalo (Kd) e Urânio Anômalo (Ud) por dois motivos: esses métodos terem menor influência de fatores geomorfológicos e estão associados à parâmetros sugestivos de alteração hidrotermal.

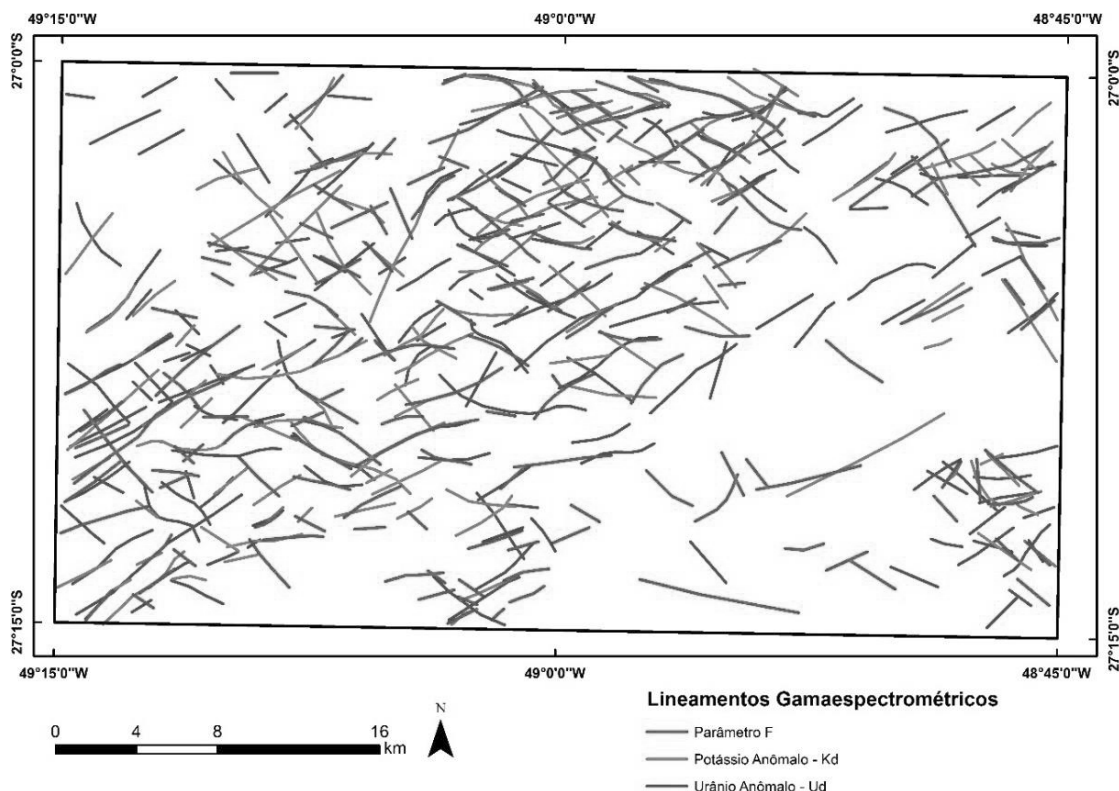


Figura 22. Lineamentos Gamaespectrométricos separados de acordo com o método.

Ainda que com a distribuição restrita, pode-se observar a complementação dos métodos magnético e espectrométrico na região central, próximas às zonas de cisalhamento, bem como respostas associadas a mineralizações auríferas (**Figura 23**). Em geral, os lineamentos dos dois métodos apresentam boa correlação, tendo respostas similares em determinadas regiões. Quanto às ocorrências de ouro, ao serem sobrepostas com os lineamentos gamaespectrométricos, parecem ter uma forte associação ou influência. Estes alinhamentos radiométricos podem ser indicativos da participação de uma reativação de estruturas controlando a distribuição das zonas hidrotermais, conforme a proposta de Biondi *et al.* (2007).

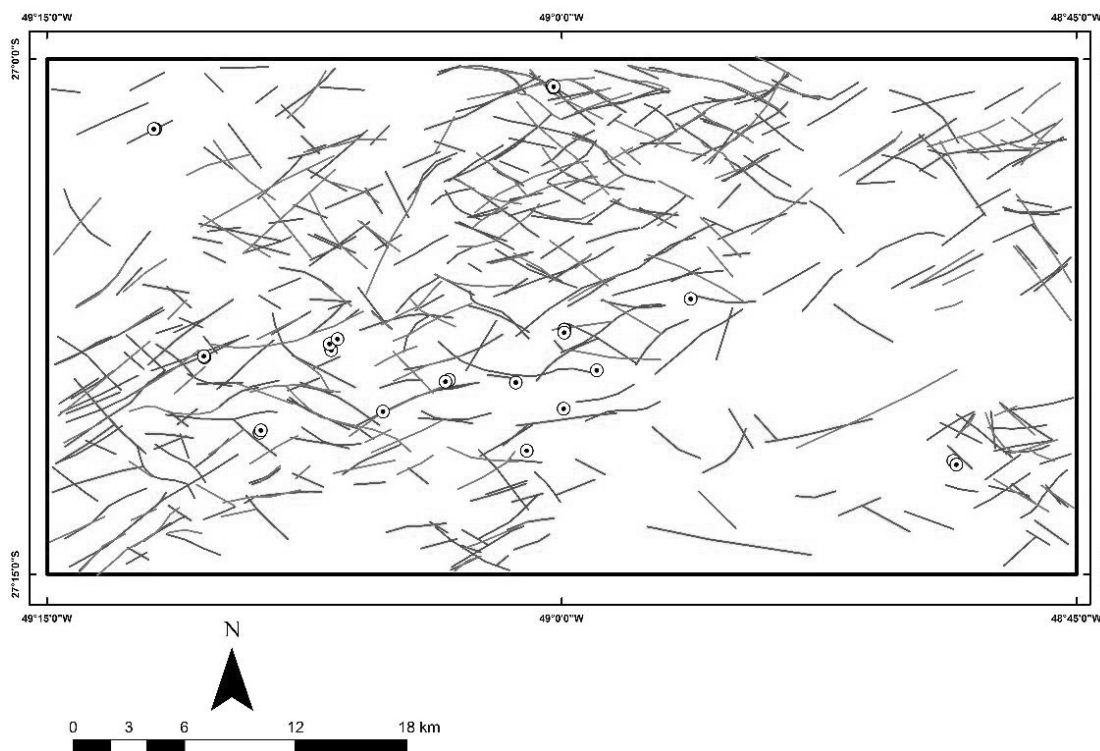


Figura 23. Lineamentos gamaespectrométricos e sua relação com mineralizações auríferas.

4.3. Parâmetros Sugestivos de Alteração Hidrotermal

Os parâmetros sugestivos de alteração hidrotermal – Parâmetro F (PF), Potássio anômalo (Kd) e Urânio anômalo (Ud), foram aplicados a fim de se observar a distribuição dos elementos potássio e urânio que tendem a se concentrar em áreas de alteração hidrotermal (Ostrovskiy, 1975; Gnojek & Prichystal, 1985; Portnov, 1987; Pires, 1995). Os três mapas (PF, Kd e Ud) foram analisados tanto separadamente, quanto em conjunto, por meio de um mapa de composição ternária. Valores acima da média mais um (01) desvio padrão ($x+S$) também foram estudados, a fim de se identificar áreas com anomalias muito acima da média, e assim buscar suas relações com as mineralizações.

O parâmetro F é um método baseado na distribuição de K em função da relação U/Th, evidenciando zonas ricas em K sobre áreas diferenciadas, considerando que a relação U/Th evidencia o nível de diferenciação das rochas ígneas (Gnojek & Prichystal, 1985) e o Kd (e Ud) exibe valores anômalos com base na distribuição de Th. Na área de pesquisa, os maiores valores de PF e Kd distribuem-se sobre uma faixa SW-NE que atravessa do sudoeste ao centro norte. Estes altos valores coincidem com várias intrusões graníticas, incluindo o Batólito Valsungana Norte, e estão alinhados com estruturas NE que passam através do CMB. Observa-se baixos valores para o parâmetro baixo de F e Kd no Batólito Valsungana Sul, apenas com valores elevados em uma porção do sudeste próximo a esta intrusão. Esta relação entre valores elevados de PF e Kd contribui para a idéia de que o Batólito Valsungana Norte e outras intrusões menores (Rio da Areia, Faxinal, Gaspar, Santo Antônio, Lageado Mirim, Lageado Alto e Lageado Baixo) passaram por um intenso processo de alteração hidrotermal associado ao desenvolvimento de estruturas, como sugerido por Biondi *et al.* (2007). O Ud apresenta uma distribuição semelhante, indicando a relação entre o urânio e processos hidrotermais, porém com valores mais dispersos sobre a área.

Os mapas de contorno de Parâmetro F, Kd e Ud foram elaborados para se identificar valores superiores à média global da área. Para isso, foram aplicados contornos de valores superiores à média mais um (01), mais dois (02) e mais três (03) desvios padrões, no entanto somente os valores da média mais um desvio padrão ($x+S$) apresentaram resultados significativos, evidenciando áreas favoráveis para alteração hidrotermal. Ao se sobrepor as ocorrências de ouro ao mapa de contornos, percebe-se que as mineralizações se encontram próximas às áreas delimitadas (**Figura 24**).

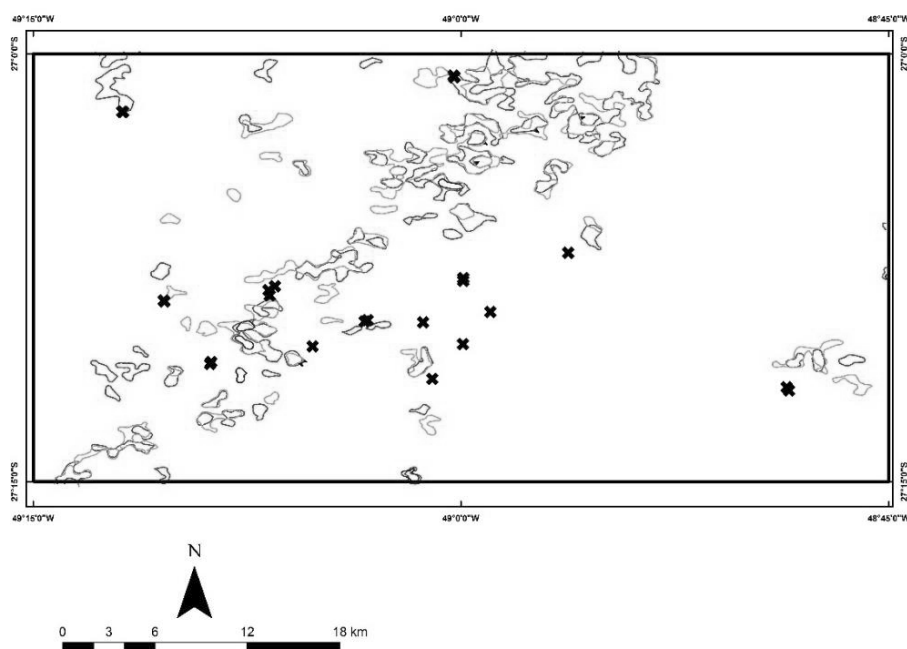


Figura 24. Valores superiores a $x+S$ para Kd (verde), Ud (azul) e PF (vermelho), com indicação das rochas mineralizadas (em preto).

4.4. Integração dos dados Magnéticos e Radiométricos

Os depósitos de Au da região de Botuverá e Brusque são definidos por veios quartzo-sulfetados resultantes de processos hidrotermais magmáticos, com posterior remobilização das mineralizações causadas pela reativação de falhas e zonas de cisalhamento (Biondi *et al.* 2007). Este modelo considera que não houve geração de novos fluidos que geraram mineralizações, somente a remobilização do minério e modificação da geometria dos depósitos, preservando as zonas de alteração hidrotermal características do sistema magmático. Com base neste contexto, através da combinação do método radiométrico na identificação de zonas hidrotermais com o método magnético para a caracterização estrutural, é possível se definir zonas favoráveis para a ocorrência de mineralizações em ouro.

Com a sobreposição dos lineamentos magnéticos de direção NE aos mapas do Parâmetro F, Kd e Ud (**Figura 25, Figura 26, Figura 27**), observou-se que anomalias magnéticas e radiométricas apresentam uma distribuição similar na área de estudo, com diversos picos dos sinais destes dois métodos coincidentes. Ao se analisar a distribuição das ocorrências de Au, percebe-se que estas estão frequentemente localizadas sobre ou próximas às regiões onde as anomalias coincidem. Irvine & Smith (1990) e Shives *et al.* (2001) definem que a aplicação da gamaespectrometria e magnetometria em conjunto é fundamental na identificação de áreas favoráveis para a existência de mineralizações, corroborando a relação das anomalias geofísicas com processos mineralizadores.

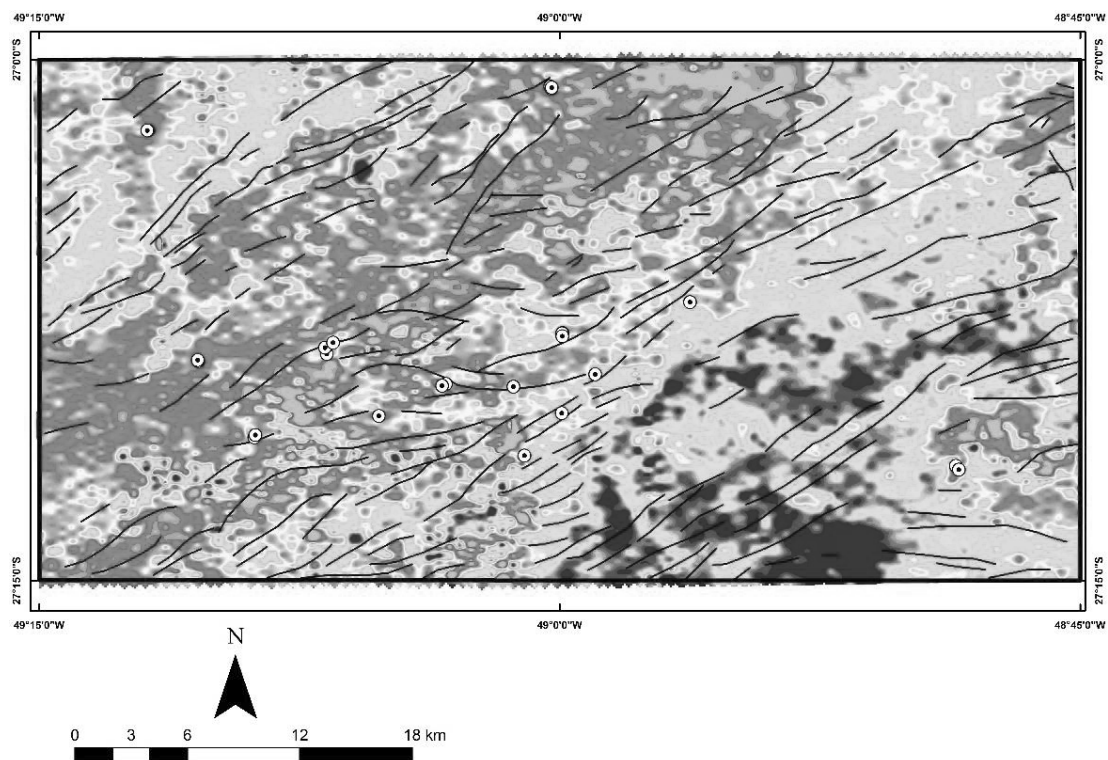


Figura 25. Mapa do Kd com lineamentos (em preto) e ocorrências auríferas (em branco) sobrepostos.

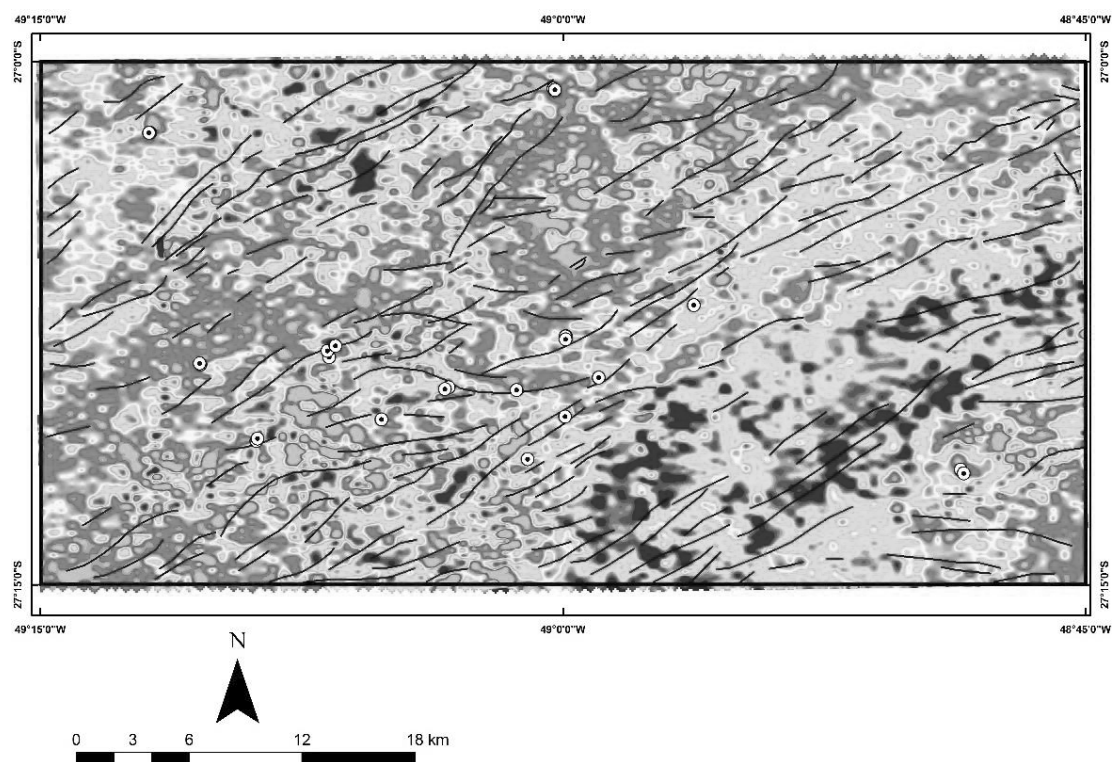


Figura 26: Mapa do Ud com lineamentos (em preto) e ocorrências auríferas (em branco) sobrepostos.

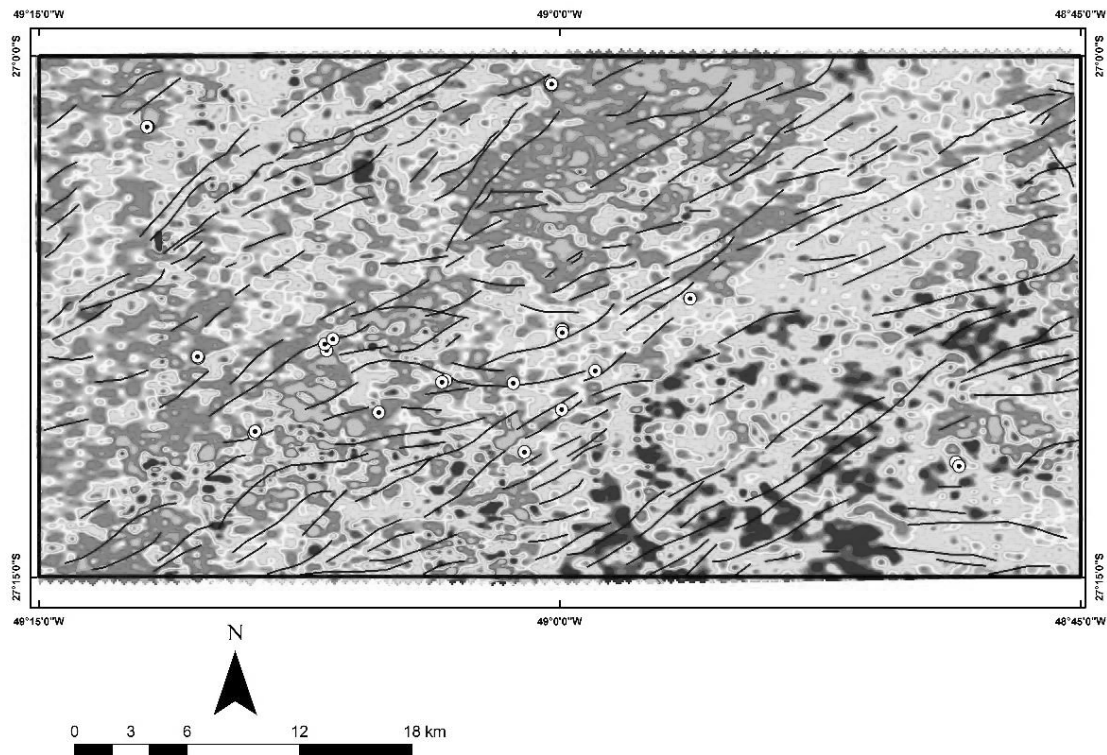


Figura 27: Mapa do PF com lineamentos (em preto) e ocorrências auríferas (em branco) sobrepostos.

Irvine and Smith (1990) e recomenda em seu trabalho o uso de mapas ternários para pesquisa. Entre estes mapas, o autor considera a aplicação do método magnético e radiométrico em um mapa ternário, com o potássio (vermelho), tório (verde) e o campo magnético (azul), no mapamendo, podendo ser instrutivo na interpretação geofísica. Para este trabalho foi aplicado o ISA – Inclinação do Sinal Analítico no azul (**Figura 28**), pois este método realça mais precisamente o centro da anomalia e o sinal independe da profundidade da fonte.

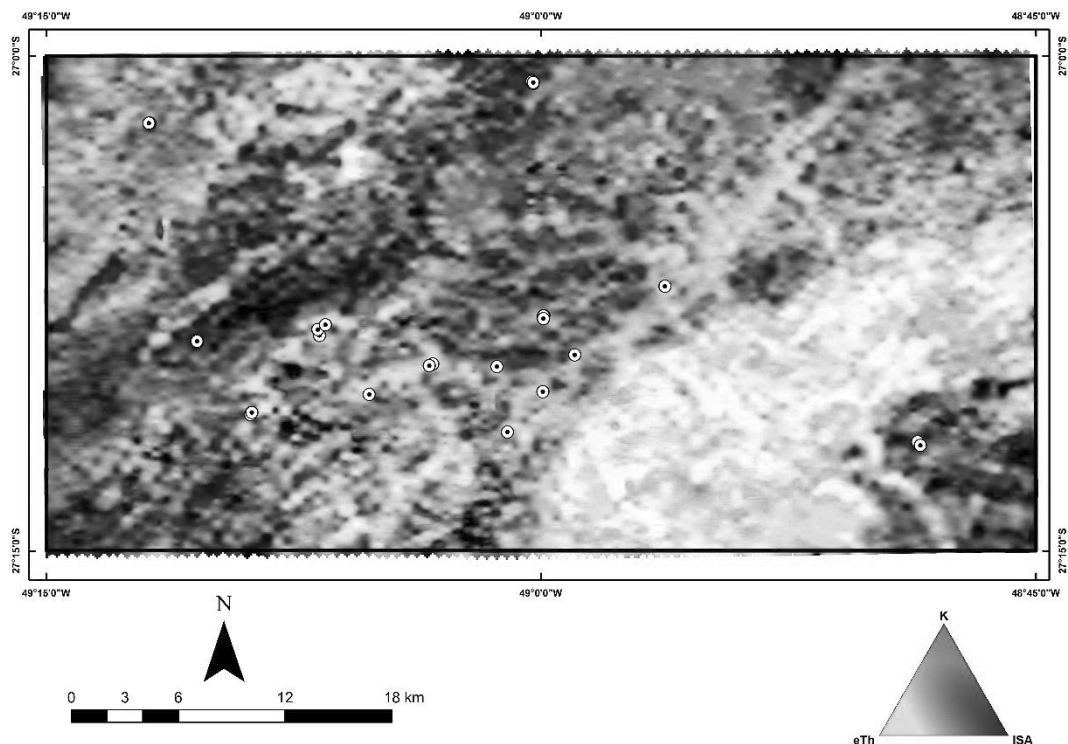


Figura 28: Mapa dos métodos magnéticos e radiométricos, conforme sugerido por Irvine & Smith (1990).

O mapa ternário integrado à magnetometria (**Figura 29**) evidencia importantes fatores conjuntamente: o tório, por ser um elemento com pouca mobilidade geoquímica, tende a marcar a fonte original do sinal radiométrico, filtrando efeitos produzidos por agentes exógenos; o potássio resalta áreas onde possa ter ocorrido processos hidrotermais e o ISA destaca estruturas tais como falhas e zonas de cisalhamento, bem como a borda de corpos susceptíveis. Ao se integrar as mineralizações auríferas com este mapa ternário, é possível observar que zonas com enriquecimento em Th e K (cor amarela no mapa ternário) associadas a zonas de alto K e picos em ISA (cor rosa no mapa ternário) frequentemente apresentam ocorrências próximas, podendo ser um importante guia na definição de áreas para a ocorrência de mineralizações.

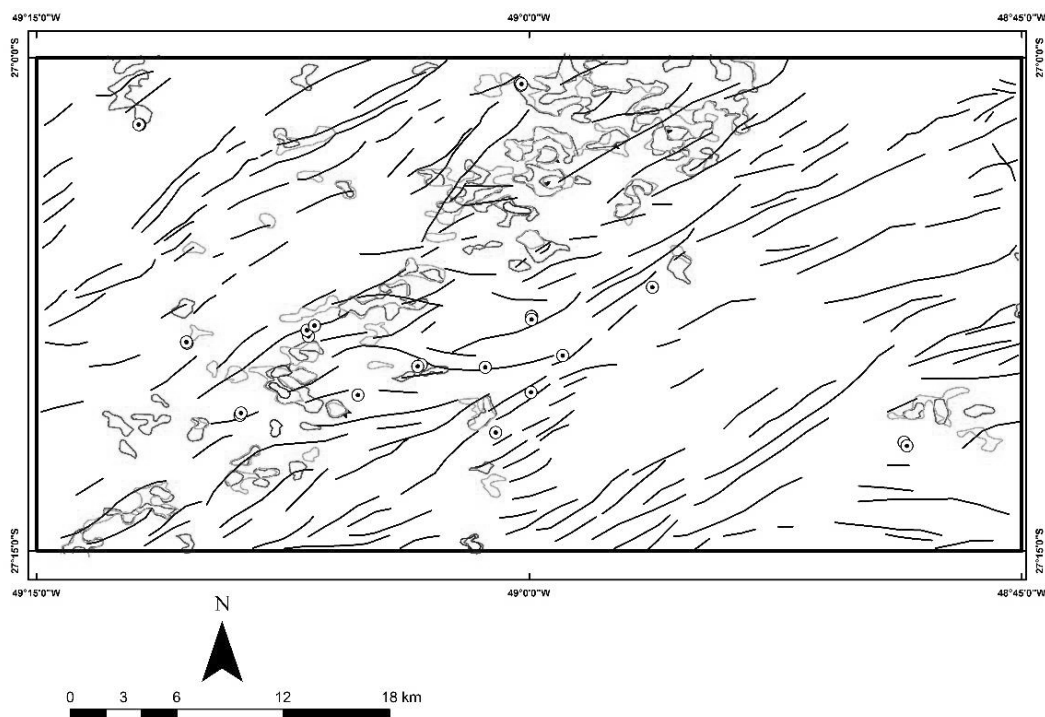


Figura 29: Áreas com valores superiores a $x+S$ para Kd (verde), Ud (azul) e PF (vermelho), combinados aos lineamentos magnéticos NE (em preto) e ocorrências auríferas (branco).

4.5. Zonas de Favorabilidade

A partir da equação de zonas de favorabilidade, os valores foram distribuídos em cinco classes de acordo com o desvio padrão: **Muito Baixa** (0,00 a 1,34); **Baixa** (1,34 a 3,85); **Média** (3,85 a 6,58); **Alta** (6,58 a 9,30) e **Muito Alta** (9,30 a 11), conforme a **Figura 30**. Através do mapa de favorabilidade, observa-se uma faixa NE central onde ocorrem grandes porções de áreas de favorabilidade Muito Alta, Alta e Média. Outras regiões que apresentam valores altos a muito altos que podem ser destacadas são uma pequena porção a NW, inserida no Grupo Itajaí, uma junto à ZCIP e em uma pequena área próxima ao contato do granito Valsungana Sul com o CMB. Ao se verificar a correlação das mineralizações com o mapa de favorabilidade, é possível perceber que estas encontram-se quase sempre em áreas com valores médios a muito altos, e quando não, muito próximas a estas áreas, mostrando que essas áreas podem apresentar potencial para hospedar outras mineralizações auríferas ainda não conhecidas.

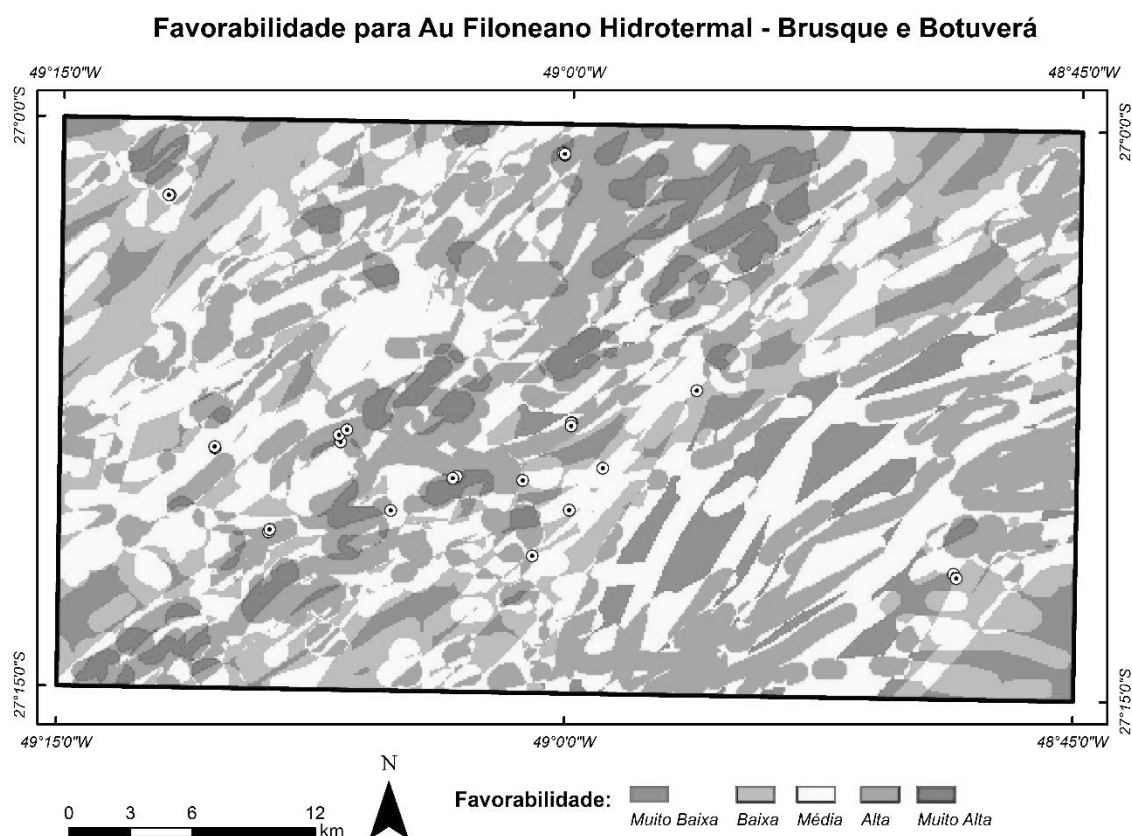


Figura 30: Mapa de favorabilidade com base na sobreposição dos fatores para ocorrências auríferas. As mineralizações em Au estão representadas pelos círculos em branco.

5. CONCLUSÃO

Através da análise dos dados gamaespectrométricos e magnetométricos do Projeto Aerogeofísico Paraná – Santa Catarina (PPRSC) e sua comparação com os dados do Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul (PSMS) reprocessados pelo BARMP (1997), foi possível observar que, em relação ao levantamento mais antigo, houve um ganho na qualidade, resolução e área de abrangência, podendo este projeto contribuir de forma mais efetiva na delimitação do arabouço geofísico do pré-cambriano paranaense e catarinense.

Com este trabalho, observou-se também a efetividade dos métodos aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria), na definição de novos alvos potenciais para a ocorrência de mineralizações auríferas, havendo ganhos consideráveis em relação a trabalhos anteriores. A gamaespectrometria apresentou uma boa correlação com o contexto geológico da área de estudo, delimitando de forma clara corpos graníticos das suítes Valsungana, Nova Trento e São João Batista, unidades gnaissicas do Complexo Ribeirão da Prata e sequências sedimentares do Grupo Itajaí. No Complexo Metamórfico Brusque, foi possível distinguir a resposta da Formação Rio da Areia, assim demonstrando ser uma importante ferramenta auxiliar no mapeamento geológico. Da mesma forma, a magnetometria mostrou respostas interessantes para estruturas (falhas, fraturas,

diques), em especial à Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó e a outras que atravessam o CMB, sendo bastante eficaz na definição do arcabouço estrutural.

Através da integração entre a geofísica e os dados geológicos, foi possível se observar que a faixa NE central da área apresenta a maior concentração de zonas de favorabilidade para a ocorrência de mineralizações auríferas do tipo hidroteral filoneano, além de parte do Grupo Itajaí e do contato entre o granito Valsungana Sul e o CMB. Em relação a trabalhos anteriores, novos alvos com possíveis mineralizações foram estabelecidos, apresentando novas possibilidades na pesquisa mineral na porção leste de Santa Catarina.

Irvine & Smith e Shives *et al.* (2001) consideram a aplicação dos métodos gamaespectrométrico e magnetométrico fundamentais em trabalhos de pesquisa mineral. Observando as repostas magnéticas e radiométricas próximas a mineralizações já conhecidas por trabalhos anteriores, verificou-se que estas apresentam altos valores em ambos os métodos, porém as ocorrências aparentam ter mais relação com os lineamentos magnéticos. Conforme definiram Biondi *et al.* (2007), os depósitos auríferos hidrotermais da região de Botuverá foram formados no sistema mineralizador hidrotermal magmático, com posterior modificação da geometria pela ativação de estruturas, justificando estas respostas próximas às mineralizações.

6. ARTIGO

AIRBORNE GEOPHYSICAL SURVEY COMPARISON AND THE USE OF MAGNETOMETRY AND GAMMASPECTROMETRY IN THE IDENTIFICATION OF GOLD RELATED HYDROTHERMAL ALTERATION ZONES IN SOUTH BRAZIL

Authors:

Bruno Macchioni Pereira

Francisco José Fonseca Ferreira

ABSTRACT

The regions of Brusque and Botuverá, located in the eastern portion of Santa Catarina State, are located in the contact between Luís Alves and Tijucas Terranes, defined by Itajaí-Perimbó Shear Zone. The lithostratigraphic units present in the area are the Ribeirão da Prata Complex, composed of paleoproterozoic migmatites and gneisses, the metavolcanosedimentary units of Brusque Metamorphic Complex from Mesoproterozoic, the neoproterozoic sedimentary units of Itajaí Group, the granitic intrusions from Valsungana, Guabiruba and Nova Trento suites, of Neoproterozoic, and the basic and alkaline intrusions of the Cretaceous. Associated with the granite intrusions, occurs Au mineralizations characterized by quartz-sulfide veins. These mineralizations are located close to granitic stocks, at the edges of large intrusions, in zones of contact metamorphism and also in roof pendants. The mineralizing fluid that generated these occurrences also produced potassium and phyllic hydrothermal alteration zones. A subsequent phase of reactivation of shear zones resulted in remobilization of fluids and sulfides, modifying the geometry and composition of the occurrences. Based on the geological data of the Area and high spatial resolution gamma-spectrometric and magnetometric data from the Paraná-Santa Catarina Aerogeophysical Project, the work presents the results of correlation from these information. One of the objectives of the present work was to establish a comparison between this geophysical survey with the Serra do Mar Sul Aerogeophysical Project, conducted in the 1970s, also the object of prospective studies in Botuverá. The magnetometry was mainly used for the interpretation of structural-magnetic framework, while the gamma-spectrometry aided the interpretation of the lithotypes and the identification of potassic hydrothermal alteration zones associated to the Au mineralizations. Methods of enhancement of magnetic anomalies were important in more precise definition of the location of structures centers and edges. Gamma-spectrometric methods such as Parameter F, Anomalous Potassium (Kd) and Anomalous Uranium (Ud) were used to define the radiometric signatures of already known Au occurrences in the area, such as Morro do Carnerio Branco, Braço Cristalino, Tigrano and the Cavalo Branco deposit, as well as to define anomalies of potassium and uranium that are not related to environmental factors, such as geomorphological conditioning and soil formation. The geological, structural, metallogenic and aerogeophysical data integration, through the construction of a Geographic Information System (GIS), allowed the development of a favorable zones map for the occurrence of hydrothermal alteration zones associated to Au mineralization.

Keywords: *Gamma-spectrometry, Magnetometry, Mineral Exploration, Dom Feliciano Belt*

6.1. INTRODUCTION

The Brusque and Botuverá regions are known for bearing the most important gold mineralization in Santa Catarina State (Castro, 1997), characterized by quartz-sulfide veins hosted in granitic stocks, Brusque Metamorphic Complex (BMC) roof pendants and xenoliths in granitic rocks and in thermal metamorphism zones, near the edges of granite/granodiorite intrusions. These occurrences are associated with granitic and metamorphic hydrothermal fluids, and are estimated in 1-2 tons of gold in Cavalo Branco occurrence, the most relevant gold mineralization known (Castro, 1997; Biondi *et al.* 2007). The studied area is located in NE portion of Santa Catarina State, in the contact between Luís Alves and Tijucas terranes, defined by the Itajaí-Perimbó Shear Zone (IPSZ). In these areas occur Ribeirão da Prata Complex gneisses and migmatites from Paleoproterozoic, the neoproterozoic metavolcanosedimentary rocks of Brusque Metamorphic Complex (BMC), the Itajaí Foreland Basin sedimentary sequences, from Neoproterozoic, granitic Valsungana, Nova Trento and São João Batista suites, also from Neoproterozoic, and Cretaceous basic/alkaline dykes and stocks.

Airborne gamma spectrometry and magnetometry has been widely used as complementary methods in geological mapping and mineral exploration, showing positive results in lithotype recognition and location of many types of mineral deposits (). Gamma spectrometry is used to detect the radioactive elements potassium (K), Uranium (U) and Thorium (Th) in Earth surface, and through F Parameter (), Kd and Ud () hydrothermal alteration zones became evidenced, where mineralization is more probable to exist. Through magnetometry, it is possible to analyze and interpret the magnetic-structural framework, and make an association between magnetic anomalies and geologic structures, eventually those who control mineralization.

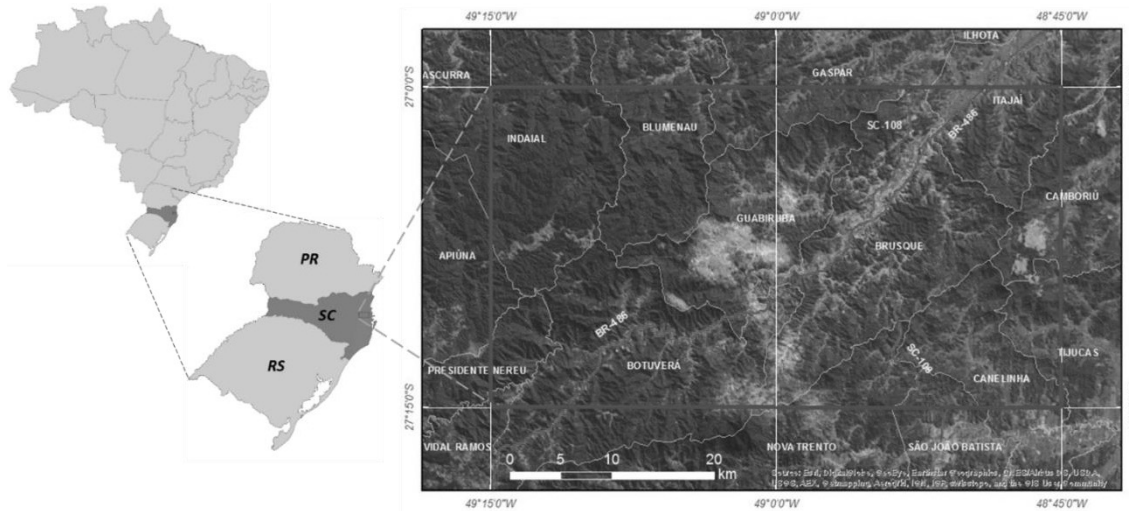
Two important aerial geophysical surveys were flown in the states of São Paulo, Paraná and Santa Catarina: Serra do Mar Sul Project (SMSP), executed in 1974, and Paraná-Santa Catarina Project (PRSCP), surveyed in 2010. Fornazzari & Ferreira (2003) used data from SMSP to identify potential targets for gold occurrences in Botuverá Sheet (Caldasso *et al.* 1995), mainly analyzing gamma-ray spectrometric data. The present work uses data from PRSCP, a more detailed survey, with narrower flight lines and modern equipment in comparison to SMSP. It is expected more accurate results and data interpretation, pointing more precisely targets for gold mineralization and showing differences between these two surveys.

6.2. THE RESEARCH AREA

The studied area corresponds to the 1:50.000 Botuverá and Brusque Sheets, located in Santa Catarina northeastern portion, and are bounded by the coordinates 49°15'00" W; 27°00'00"

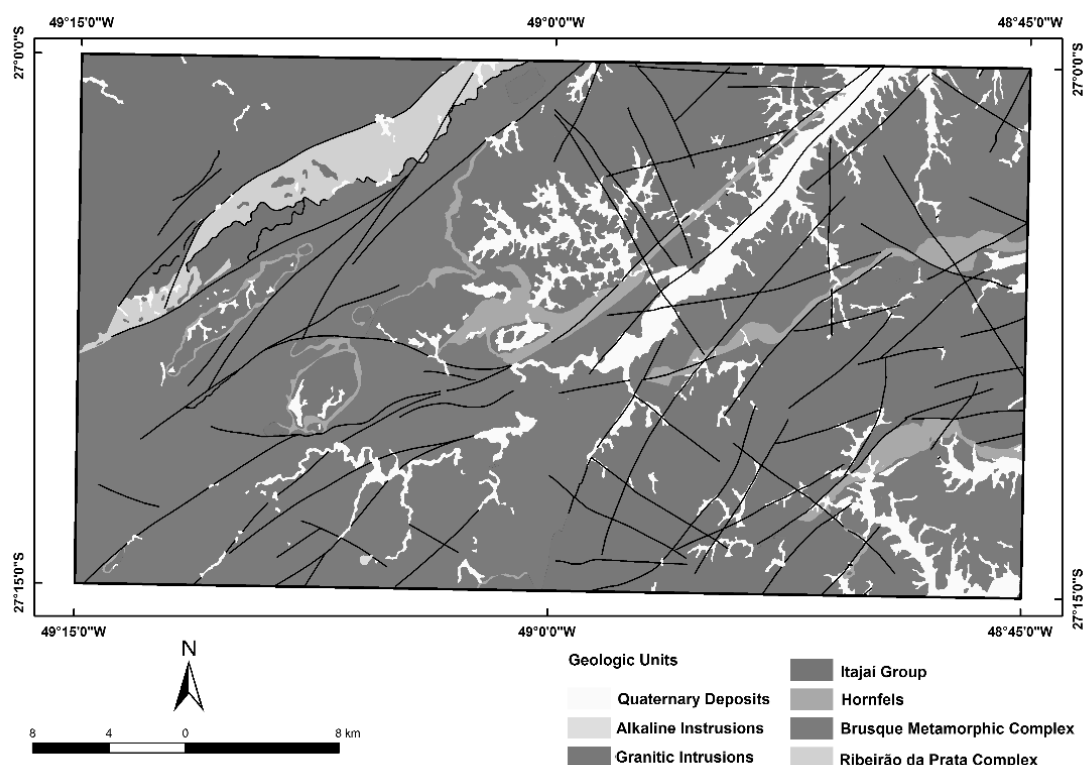
S; 48°45'00"W and 27°15'00" S. It has a total area of 1.364 km², covering partially the cities of Blumenau, Itajaí and Gaspar, and totally Botuverá, Brusque and Guabiruba.

The main access is over two principal roads: BR-486, leaving Itajaí, which crosses the area NW-SE through the cities of Brusque and Botuverá, and SC-108, which cuts the area in NS direction, leaving from Gaspar and passing by Brusque Towards São João Batista.



6.3. GEOLOGICAL SETTING

The northeastern portion of Santa Catarina state is situated in the context of contact between terranes Luís Alves and Tijucas, separated by Itajaí-Perimbó Shear Zone (IPSZ) (Wildner *et al.* 2014). Tijucas Terrane is located in Dom Feliciano Belt (DFB), the southernmost part of Mantiqueira Province (Basei *et al.* 2010b), and is classified in three domains: **(a)** Southeastern Granite Belt (Florianópolis Batolith), characterized by granitic suites with calc-alkaline to alkaline granitoids; **(b)** a central schist belt (Brusque Metamorphic Complex), represented by a series of green schist to amphibolite facies metavolcanosedimentary sequences, intruded by several granitic bodies from Valsungana, Nova Trento and São João Batista suites; and **(c)** Foreland Basin (Itajaí Group), consisted in sedimentary and volcanic sequences. DFB is resulted from several terrane collision and amalgamation in Proterozoic and Lower Cambrian, related to Brasiliana and Rio Doce orogeny, ending in the Western Gondwana formation (Basei, 2000; Basei *et al.* 2010b).



6.3.1. Ribeirão da Prata Complex

In Botuverá, occurs a narrow NE-SW direction belt, composed by monzonitic orthoderivated felsic gneisses and granulite derivation mafic gneisses, with local quartz-feldspar composition. According to Wildner *et al.* (2014), this unit is part of a set of granite-gneiss-migmatite complex from Tijucas Terrane, and is considered as part of DFB basement, exposed by a thrust fault system related to IPSZ (Caldasso *et al.* 1995; Basei, 2000; Basei *et al.* 2010b, 2011). U-Pb dating in zircon and Nd isotopes show an complex polyphasic evolution, with juvenile depleted TTG and tholeiites accretion at 2,2 Ga, and accretion of juvenile undepleted granitic magmas at 2,175 Ga, as result of Archaean crust melting about 2,0 Ga. This 200 million years orogeny were succeeded by 1,4 Ma of tectonothermal and magmatic quiescence that resulted in a craton formation, ending in the Neoproterozoic Brasiliano overprint at about 590 Ma (Silva, 2000).

6.3.2. Brusque Metamorphic Group

The Brusque Metamorphic Complex (BMC) consists in a 40 km wide schist belt stretched in NE-SW direction, divided by two major Valsungana suite bodies, and is bounded by IPSZ in north, and Major Gercino Shear Zone (MGSZ) in south. This unit is composed by

metavolcanosedimentary rocks, such as metapelites, metapsamites, schists, quartzites, marbles, calc-silicates and metabasics, metamorphosed in green schist to amphibolite facies. The protoliths are understood as marine sediments deposited during Adamastor Ocean opening. Its evolution is associated to Brasiliano cycle and Western Gondwana formation, and is the result of interaction between Rio de La Plata, Paranapanema, Congo and Calahari cratons (Basei, 2000; Basei *et al.* 2011). Basei *et al.* (2006) (*apud* Basei *et al.* 2011) divided BMC in three formations, based on regional studies, cross-sections and 1:100.000 mapping: Rio da Areia, Botuverá and Rio do Oliveira formations.

Rio da Areia Formation is BMC's upper part, and includes four units: (i) *Metavolcanic*: formed by metamafic to metaultramafic rocks, such as metabasalts metaperidotites, basic metatuffs, transformed into chlorite-schists and tremolite schists, with local occurrences of metasedimentary rocks; (ii) *Quartzitic*: composed of massive medium-grained orthoquartzites with recrystallized parts, and interleaved layers of micaceous and feldspar quartzite, quartz-mica schists and mica layers; (iii) *Metacarbonatic*: characterized by thick layers of massif calcitic/dolomitic marble and metamarls, calc-schists and subordinated sericite-schists; and (iv) *Metapelite-Carbonatic*: it is composed by metamarls, calc-schists, massive metalimestone and metadolomite lenses. The metapelitic rocks that integrate this unit exhibit a fine foliation, and are composed by sericite schists, chlorite-sericite schists and quartz-sericite schists. Metarhythmite intercalations are characterized by alternating centimeter- and decimeter-sized metapelite and metapsammite layers.

Botuverá Formation is composed by metasiliciclastic rocks, presenting low to medium metamorphism. This formation can be divided in three units: (i) *Metapelitic*: consists in sericite schists and sericite-chlorite schists bearing sericite, quartz and biotite. These rocks are presents a microbanding composed by alternation of sericitic and quartzitic layers, as result of deformation; (ii) *Metarhythmic*: rhythmic phyllites that gradually pass to predominantly psammite rythmites, quartz schists intercalation and quartz-sericite schists interleaved to phyllites with quartz *boudins*; (iii) *Metapsammitic*: occurs as two elongated NE-SW bodies, predominantly composed by orthoquartzites and micaceous quartzites, locally containing sericite quartzites with chloritoid and garnet.

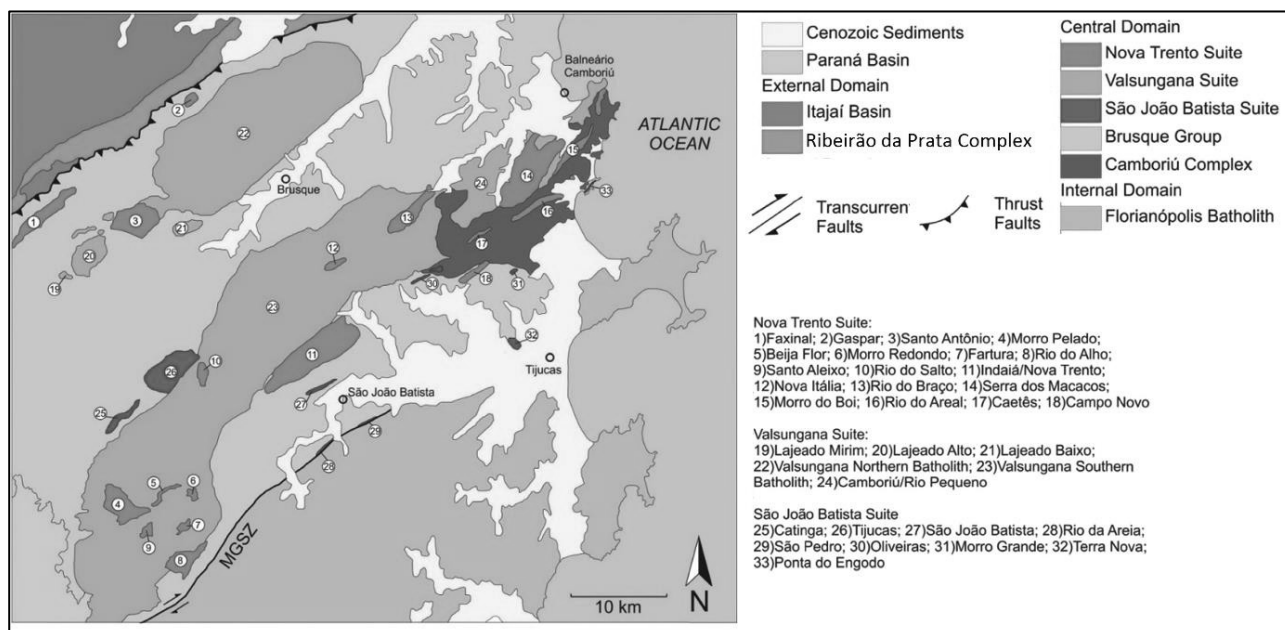
Rio do Oliveira Formation groups mainly metavolcanosedimentary sequences, characterized by four SW-NE oriented units: (i) *Metapsammitic*: is the upper portion, composed by basal massif orthoquartzites grading to rhythmic interspersed bands of sericite-quartz schist and quartzite layers, polymitic paraconglomerates and banded iron formations (bifs) on top; (ii) *Metapelitic*: predominantly composed by mica schists, garnet, biotite and andalusite bearing quartz-muscovite schists, sericite-quartz schists with biotite, and quartz-muscovite schist with garnet and graphite. In this unit, is commonly found amphibolites, garnet amphibolites, quartzites

and calc-silicatic rocks interleaved ;(iii) *Metavolcanic-exhalative*: Consisted in tourmalinites intercalated to tourmaline-rich quartzites and carbonatic rocks. The tourmalinites presents a chert-rich/tourmaline rich layer banding. Close to Valsungana Granite, it is observed metapelitic intercalation of sillimanite-quartz-muscovite schists, locally containing andalusite and cordierite due to thermal metamorphism; (iv) *Metabasic and Calc-silicate*: constituted by fine to medium grained amphibolites with plagioclase, opaque minerals and hornblende, containing subordinated epidote and zircon. The protoliths from this unit were interpreted as ultramafic rocks and basalts, carbonatic rocks and basic tuffs

Geochronological data points that BMC had its development exclusively in Neoproterozoic, with taphrogenic processes around 940 Ma, followed by rift phase in 840 Ma. Sedimentation ended around 640 Ma, due to tectonic and metamorphic polyphasic events. In 600 Ma BMC was committed by intense sin- to late-magmatism (Valsungana, Nova Trento and São João Batista magmatic suites). By the end of Ediacarian, BMC established as a tectonic stable area.

6.3.3. Granitic Intrusions

In Brasiliano cycle, DFB has been though intense sin- to late-tectonic granitic magmatism, related to a second deformation phase, and is represented by Valsungana, Nova Trento and São João Batista suites (e.g. Castro, 1997; Basei, 2000, Basei *et al.* 2011 b, Hueck *et al.* 2016). These granites are intrusive in BMC, exhibiting locally tectonic contacts, due to its emplacement during deformation. Rare Earth Elements (REE) patterns and isotopic geochemistry indicate strong crustal signature, relating this intrusion to BMC and its basement (Hueck *et al.* 2016). Apparently, these three suites were formed in the same fusion event, but in different crustal levels; while São João Batista Suite was mainly formed by BMC metasediments partial fusion, Valsungana and Nova Trento suites have as main source deep gneissic rocks.



Valsungana Granitic Suite consists in two batholiths elongated in SW-NE direction, named as North Valsungana and South Valsungana, in addition to other smaller bodies around these major intrusions. These rocks are composed by coarse granulation and porphyritic texture biotite monzogranites to sienogranites and granodiorites, with feldspar megacrystals and frequent BMC xenoliths (Caldasso *et al.* 1995; Wildner *et al.* 2014). Geochemical and geochronological analysis indicates meta- to peraluminous composition, granite “S” type, from calc-alkaline series, and magmatism ages around 620-600 Ma (Basei, 1985; Silva, 1991; Castro. 1997; Basei *et al.* 2011; Hueck *et al.* 2016). Nova Trento Granitic Suite is composed by small stocks intruded in BMC and in Valsungana Suite. This intrusions consists in equi- to inequigranular texture, fine grained monzogranites to sienogranites with presence of Valsungana and BMC xenoliths. Lithogeochemical data shows that these rocks are “S” type granites, with peraluminous composition and calc-alkaline series. Radiometric dating points a 600-580 Ma magmatism (Basei *et al.*, 2011). São João Batista Granitic Suite is represented by intruded stocks around the Valsungana Granite Suite, showing intrusive and occasionally gradual contacts, suggesting contemporaneousness of the intrusions (Basei, 2000; Al., 2011). This suite is composed by alkali-feldspar granites, sienogranites and leucocratic to hololeucocratic monzogranites, with fine to medium-grained and equi- to unequigranular texture (Hueck *et al.*, 2016). Litogeochemical analyzes suggest peraluminous composition, calcium-alkaline series, type "S". Geochronology indicate 610 Ma as the age of formation of these rocks (Hueck *et al.*, 2016).

6.3.4. Itajaí Group

Itajaí Group is consisted by a sedimentary sequence deposited over a WSW-ENE direction foreland basin, formed during Brasiliano Orogeny, as consequence of crustal subsidence due to DFB overload (Rostirolla *et al.* 1992 a; Schroeder, 2006; Basei *et al.*, 2011 a; Costa & Nascimento, 2015). Itajaí Group is in contact with Santa Catarina Granulite Complex in north and BMC and Ribeirão da Prata Complex in south. According to geochronological data, sedimentation started around 600 Ma and ended in 560 Ma, restricted to Neoproterozoic. Magmatic activities and tectonic deformation extended over 40 Ma after sedimentation. Itajaí Group is composed by conglomerates, sandstones, rythmites, turbidites and pelites, with layers of tuff interleaved and permeating rhyolites and granites.

Several studies divide the Itajaí Group according to facies association (Rostirolla *et al.* 1992; Costa & Nascimento, 2015) and the lithological association (Caldasso *et al.*, 1995; Basei *et al.* 2010a). Rostirolla *et al.* (1992) individualized four facies associations: *A*: composed by alluvial and plataformal systems; *B*: consisted in turbidite systems; *C*: represented by deep marine pelites; and *D*: Deltaic Fans. Caldasso *et al.* (1995) classifies Itajaí Group in six units: *Undivided*: represented by conlomerates, arkoses and deformed pelites in as result of IPSZ proximity; *Deltaic Fan Conglomerates*, *Sigmoidal Sandstones*; *Tabular Sandstones and Pelites*, *Submarine Fan Conglomerates*; *Tabular Pelites and Sandstones*. Basei *et al.* (2010a) divides this group in five formations: *Baú Formation*: consists in basal alluvial fan sandstones and conglomerates; *Ribeirão Carvalho Formation*: composed by silty-argillaceous rhythmic turbidites; *Rio Neisse Formation*: formed by arkosean sandstones and siltites; *Ribeirão do Bode Formation*: silty distal turbidites; and *Apiúna*: Volcanic unit represented by intrusive felsic rocks. Costa & Nascimento (2015) separates Itajaí Group in seven facies association: *AF1*: submarine fans and distributary channels; *AF2*: frontal turbiditic lobes; *AF3*: distal turbiditic lobes; *AF4*: prodelta and delta-front; *AF5*: deltaic plains and braided fluvial channels; *AF6*: braided fluvial channels and; *AF7*: alluvial fans and gravelly rivers conglomerates.

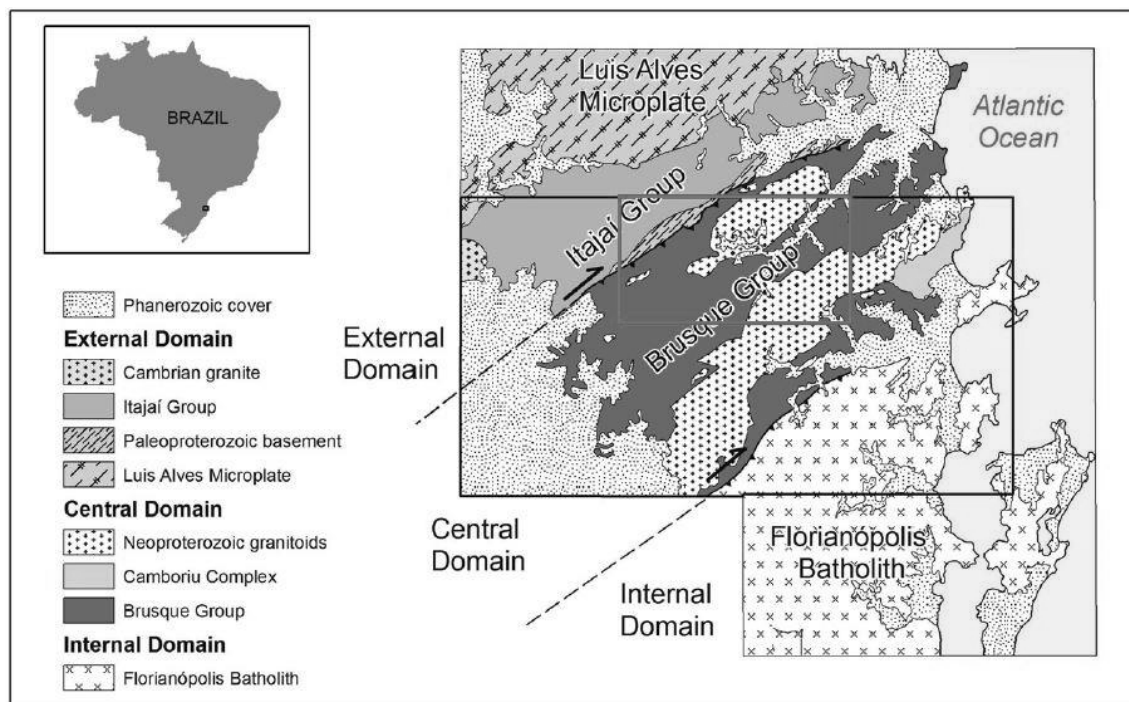
6.3.5. Mesozoic Intrusions

The main expression of Mesozoic magmatism are diabase dykes that occur in all the area, with different thickness and width. These dyke are oriented in SE-NW direction, and generally presents fine to medium granulometry and equigranular texture. In addition to the dykes, a small alkaline stock is present in south portion of Botuverá, with trachyte composition (Caldasso *et al.*, 1995).

The intrusion of these dykes and stock occurred in Low Cretaceous, and is associated with a structure named Ponta Grossa Arch, a crustal flexure that created intense ruptile deformation, enabling the emplacement of these rocks (Conceição *et al.* 1988; Castro *et al.*, 2003).

6.3.6. Tectonic and Structural Evolution

Basei (1985; 2000) suggests four deformation phases in DFB: First deformation phase affected only BMC rocks, and is represented by foliation S1, a not very evident structure, generally transposed and intrafoliar to structures formed by second and third phases. The subsequent phases are from Brasiliano cycle, related to compressive movements in direction to Rio de La Plata Craton. The second and third events exhibit NE-SW orientation, and NW vergence. The second phase is more evident, and is represented by the foliation S2, a transposition surface that is the main structure in CMB, with direction NE-SW, closed folds and vergence for NW. The third phase is expressed by the foliation S3, defined by the axial planes of large, normal and cylindrical, antiform and normal folds with axial planes of SW-NE direction. The fourth is associated to transcurrent movements developed through preterit structural lineaments.



6.3.7. Mineralization

Caldasso *et al.* (1995) describes gold occurrences associated to quartz veins with concentrations of iron, pyrite, chalcopyrite, galena, oxides and, subordinately, silver. These veins present preferential NE-SW direction, and are close to granite bodies edges, intruded in BMC units. There are also gold mineralization associated with tungsten. The main occurrences of gold in the region are known as Morro do Carneiro Branco, Cavalo Branco, Braço Cristalino, Tigrano, Ribeirão do Russo and Fanuelsson, characterized by presence of quartz and sulphide. In Canelinha region (Brusque Sheet), concentrations of Au associated with disseminated or massive sulphides (pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite) are present in lenses up to 10 cm thick, in concordance with banded quartz-turmalinite rocks, calcium-silicate and metabasic rocks of Metavolcanic-exhalative unit from Ribeirão do Oliveira Formation. The Au concentrations reach 0.18 ppm, with Ag (up to 1.6 ppm) and Bi (192 ppm) (Castro 1997), and are interpreted as of the vulcanogenic type (Caldasso *et al.* 1995; Castro, 1997).

Biondi *et al.* (2007), studying Cavalo Branco deposit, estimated that Cavalo Branco, Braço Cristalino and Ribeirão do Russo contain between 1,000 and 2,000 kg of gold. The evolution and genesis of these occurrences are related to plutonic type, and show hydrothermal potassic, phyllic and propilitic zones. Subsequent reactivation of transcurrent fault systems sheared the mineralized bodies, modifying their geometries. Geochemical data suggests that there was interaction of the mesothermal fluid, generated by the reactivation of the structures, mobilizing the sulfides, but did not changed incisively the composition of the mineralization, maintainig the deposits classification as plutonic type.

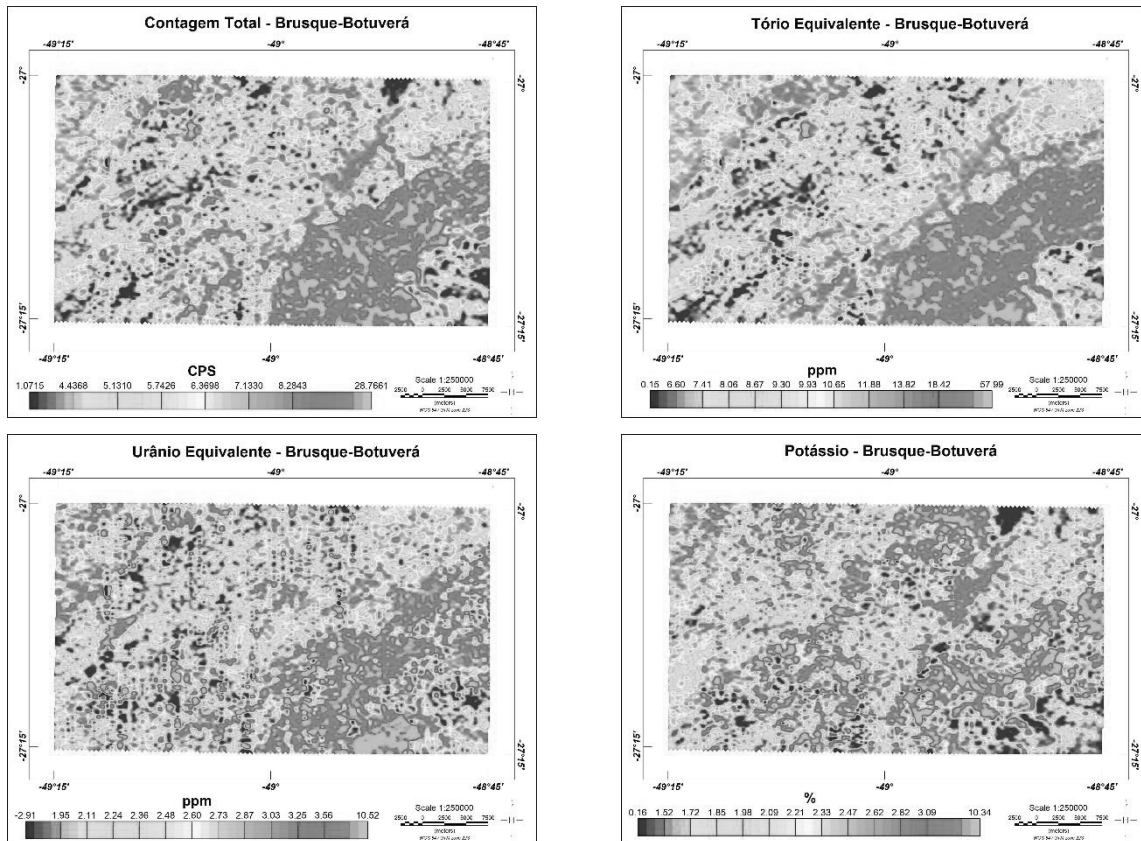
6.4. MATERIAL AND METHODS

The present research used geophysical magnetic and spectrometric data from SMSP and PRSCP, as well as geologic data from 1:50.000 Botuverá and Brusque sheets; 1:100.000 Vidal Ramos and Brusque Sheets and 1:500.000 Santa Catarina geological map. Data processing were applied in order to evidence structures and hydrothermal alteration zones. The survey comparison is used to show difference between the projects, in accuracy, precision and definition of anomalies.

6.4.1. Gamma-Ray Spectrometry

Gammaspectrometry consists in measure relative abundance or concentration of the radioactive elements Potassium (^{40}K), Uranium (^{238}U) and Thorium (^{232}Th) from first 30-40 cm of

Earth surface, through the detection of gamma radiation emitted from these elements or other from their decay series. Total Count is detected by a spectrometer, that reads radiation in the interval of 0,41 to 2,81 MeV. In this energy spectrum, each element is related to one specific channel, where its energy peaks concentrate (Dickson & Scott, 1997; Minty, 1997; Ribeiro *et al.* 2013). Some aspects can influence of data aquisition during flight, like soil covering, vegetation, soil moisture, atmosphere temperature, topography variations and directional effects. (Dickson & Scott, 1997; Minty, 1997).



Potassium is common in K-feldspar (orthoclase, microcline) and micaceous minerals, like flogopite, biotite, muscovite and some clay minerals (illite and illite/smectite). Because of this distribution, potassium concentrations are associated to felsic igneous rocks – like granite and alkalines, just as the volcanic similar and eventually in some metamorphic rocks, such as schists and phyllites (with micaceous minerals) and gneisses (containing K-feldspar) and some sedimentary rocks, like argillites, shales (clay composition) and arkoses (K-feldspar composition) (Dickson & Scott, 1997; Ulbricht *et al.* 2009). Although its distribution, potassium is a very mobile element, easily affected by weathering and hydrothermal alteration processes, so its concentrations may be not exactly related to its original source. Uranium and Thorium are less abundant than potassium in Earth crust, and are frequently associated to accessory minerals in

granitic composition rocks, like allanite, apatite, monazite, zircon, titanite, thorite, uraninite and others. Generally, these accessory minerals are related to peraluminous granites, with presence or not of aplites and pegmatites. U and Th are usually present in post-magmatic hydrothermalism, generally associated to mineralization. Although these elements are frequently related to similar sources, geochemical behavior is very different. Uranium is a very soluble element, easily carried, while thorium have few mobility, and tends to stay in its original source (Dickson & Scott, 1997; Ulbricht *et al.* 2009).

Through operations between the elements concentrations, it is possible to enhance their distribution based on its primary source, attenuating environmental factors, or even contrasting hydrothermal processes. Th/K, U/Th e U/K ratios, F Parameter from Efimov (1978) (*apud* Gnojek & Prichystal, 1985) and hydrothermal alteration suggestive parameters (K_d and U_d) (Saunders *et al.*; 1987) are important processes in hydrothermal zones identification. K/Th and K/U highlight potassium enrichment zones, generally associated to hydrothermal alteration, characterized by anomalous K concentration. Because K is a mobile element, analyzing its distribution in function of Th and U makes anomaly peaks center where potassium is not so affected by environmental processes (Dickson & Scott, 1997; Ribeiro *et al.* 2013). Portnov (1987) defined areas with K/Th ratios over 0,2 as Potassium/Thorium specialized, associated to hydrothermal alteration, and Ostrovskiy (1975) describes the potassium and thorium antagonism as an important factor to identify mineralized zones. The F Parameter analyzes both K abundance and U/Th simultaneously through the following equation: $F=K*(U/Th)$. With this relation, potassium-rich areas are highlighted over U/Th zones, helping in the identification of hydrothermal mineralization targets. Efimov (1978) (*apud* Gnojek & Prichystal, 1985) defined F Parameter values between 1,2 to 1,3 to non-altered rocks, and 2 to 5, rarely 10, to hydrothermalized areas. According to Saunders *et al.* (1987), Th and K concentrations are distributed in a linear function that passes through the origin, and its inclination determined by real potassium and thorium values (K_s and Th_s), with same relation to uranium (U_d), as shown in the equations:

$$K_i=(K_s/Th_s)*Th_s$$

$$U_i=(U_s/Th_s)*Th_s$$

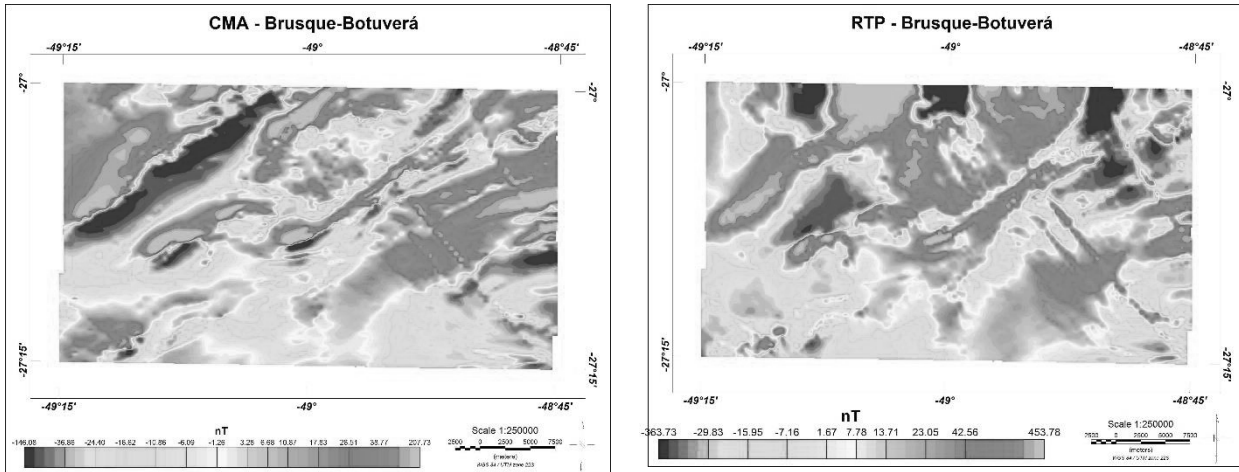
K_i and U_i are ideal values based on thorium observed value. Based on real and ideal values, anomalous values are determined (K_d and U_d), that is, bigger than expected values for the data collecting, as it is in the expression below:

$$K_d=(K_s-K_i)/K_i$$

$$U_d=(U_s-U_i)/U_i$$

6.4.2. Magnetometry

Magnetic method is used to measure rocks and structures magnetic susceptibility in Earth's crust, generated by the presence of minerals that retain part of Earth's main field magnetization, called Local Magnetic Anomalies (Telford *et al.* 1990). Magnetic field in Earth's surface come from three sources: *Main Field*: originated in Earth's core by liquid matter movement; *External Field*: related to solar and lunar activities and electric storms; and the *Local Magnetic Anomalies*, that goes to the depth of 40 km in the crust. After acquisition, magnetic data is processed in order to obtain only Local Magnetic Anomalies. Diurnal variation correction is used to remove solar and electrical interferences; IGRF reduction subtracts Main Earth Field. Reduction to the Pole (RTP) locate anomalies over its original sources, and remove bipolarity.



Using anomaly enhancing methods, based on Local Magnetic Anomalies derivation on space and frequency, anomalies features like the centers or edges are highlighted, making magnetic interpretation easier (Castro, 2015). These methods are Horizontal and Vertical Gradients (G_x , G_y , G_z), analytic signal amplitude (ASA), total horizontal derivative (THDR), tilt angle (TDR), horizontal derivative of the tilt angle (TDR-THDR), tilt angle of horizontal derivative (THDR-TDR) and Signum Transform (ST). The equations are represented below:

$$G_x = \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)^2, G_y = \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)^2, G_z = \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right)^2$$

$$ASA = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right)^2 \right]}$$

$$THDR = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2\right]}$$

$$TDR = \tan^{-1}\left(\frac{Gz}{THDR}\right)$$

$$THDR-TDR = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial ISA}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial ISA}{\partial y}\right)^2\right]}$$

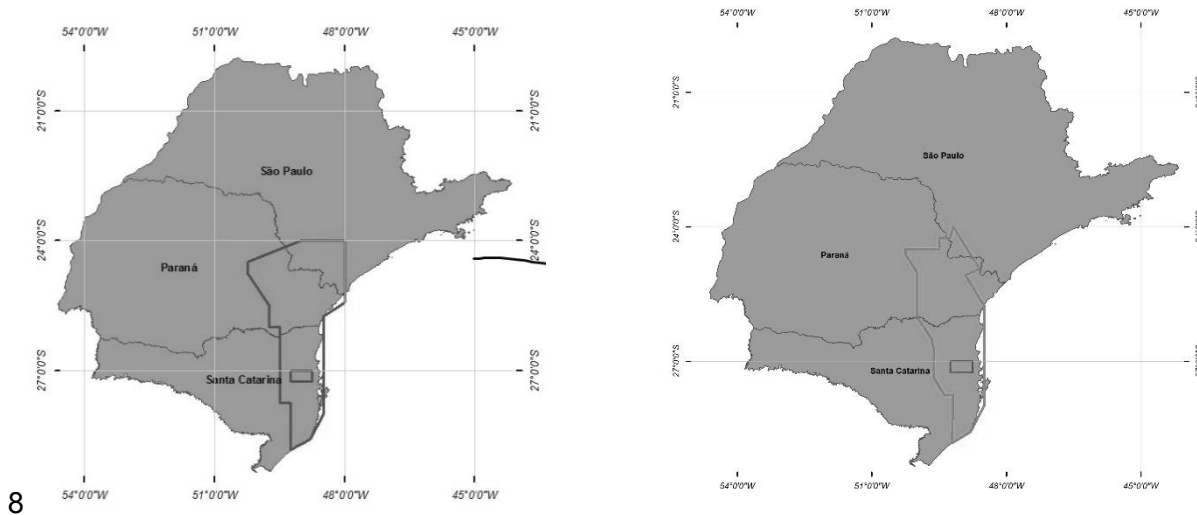
$$TDR-THDR = \tan^{-1}\left(\frac{\left(\frac{\partial GHT}{\partial z}\right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{\partial GHT}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial GHT}{\partial y}\right)^2\right]}}\right)$$

$$ST = \begin{cases} \frac{f}{|f|}, & \text{para } f \neq 0 \\ -1, & \text{para } f = 0 \end{cases}$$

6.4.3. SMSP and PRSCP

Serra do Mar Sul Aerogeophysical Project (SMSP) is an airborne geophysical survey flown from 1974 to 1977 by GEOFOTO S.A. to CPRM, covering an area of 48.600 km² in eastern portion of Paraná and Santa Catarina, in addition to southeastern part of São Paulo. The survey had 49.880 km of flight lines spaced 1.000 meters apart, in a range of 750 to 1.250 meters. Line directions are N30W and tie lines space 20 km, with flight height ranging from 105 to 165 meters. This data was reprocessed by Brazilian Airborne Radiometric Mapping Project (BARMP) in 1997, in order to remove peaks, related to signal noise, microlevelling and retrocalibration (conversion of cps to concentration). Paraná – Santa Catarina Aerogeophysical Project (PRSCP) is a survey

realized from 2009 to 2011 by LASA PROSPECÇÕES S.A. to CPRM, over a similar area of SMSP, but considerably bigger. It cover an area of 65.562 km² over eastern part of Paraná and Santa Catarina, and south São Paulo. About 140.397,98 km of profiles were surveyed collecting magnetometric and gammaspectrometric high spatial resolution data, over the pre-Cambrian units. flight line and control lines of 500 and 10,000 meters and oriented in the NS and EW directions respectively. The sampling intervals were 6 and 60 meters for magnetometry and spectrometry. Nominal flight height was about 100 meters.



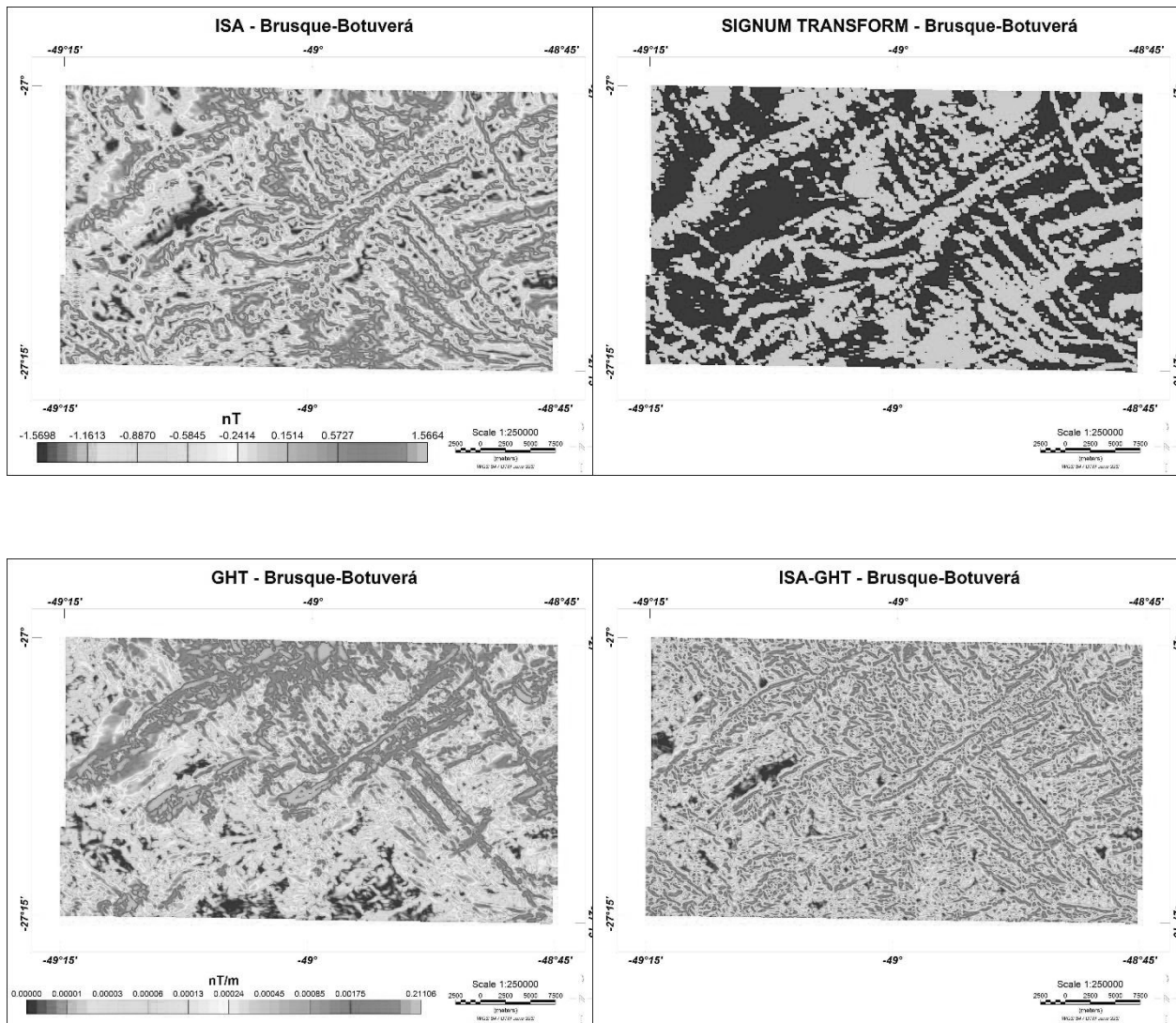
6.5. DISCUSSION AND RESULTS

The discussion is based on interpretation of magnetic and spectrometric data. Magnetic method was mainly used for delimitation of structural framework, as it detects deep to shallow faults and shear zones, through magnetic lineaments, especially with anomaly enhancing methods. Gammaspectrometric method was applied in lithology interpretation and hydrothermal zones identification, by setting gammaspectrometric domains and defining anomalous potassium and uranium zones.

6.5.1. Magnetic Data Interpretation

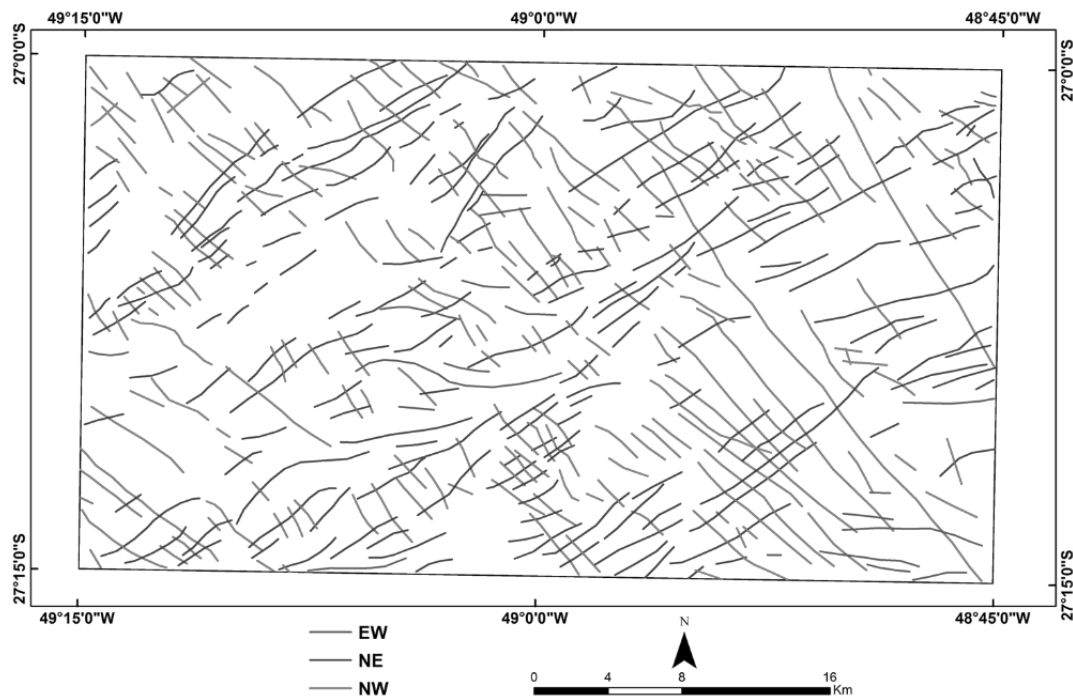
After data processing, magnetic peaks were centered in the edges or center of signal sources using anomaly enhancing maps, and associating these features principally to structures, but also to mafic rocks (diabase dykes and amphibolite layers). Lineaments were traced over magnetic signals, in order to interpret direction trends, distribution, and its correlation to structural

framework. Magnetic lineaments analysis showed three structure direction trends: NE, NW and subordinately EW.

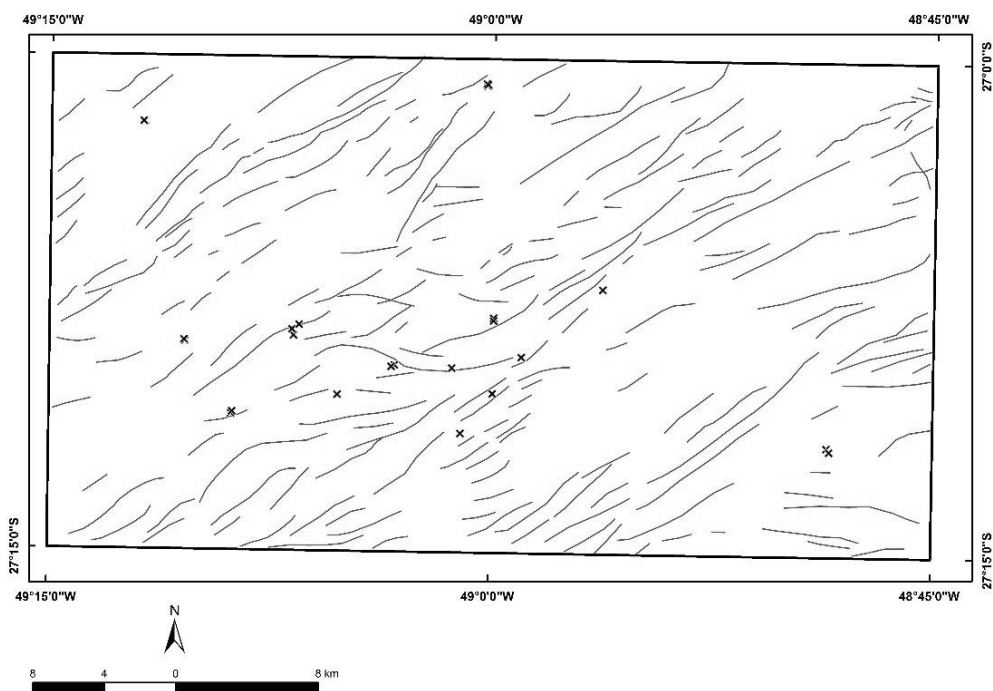
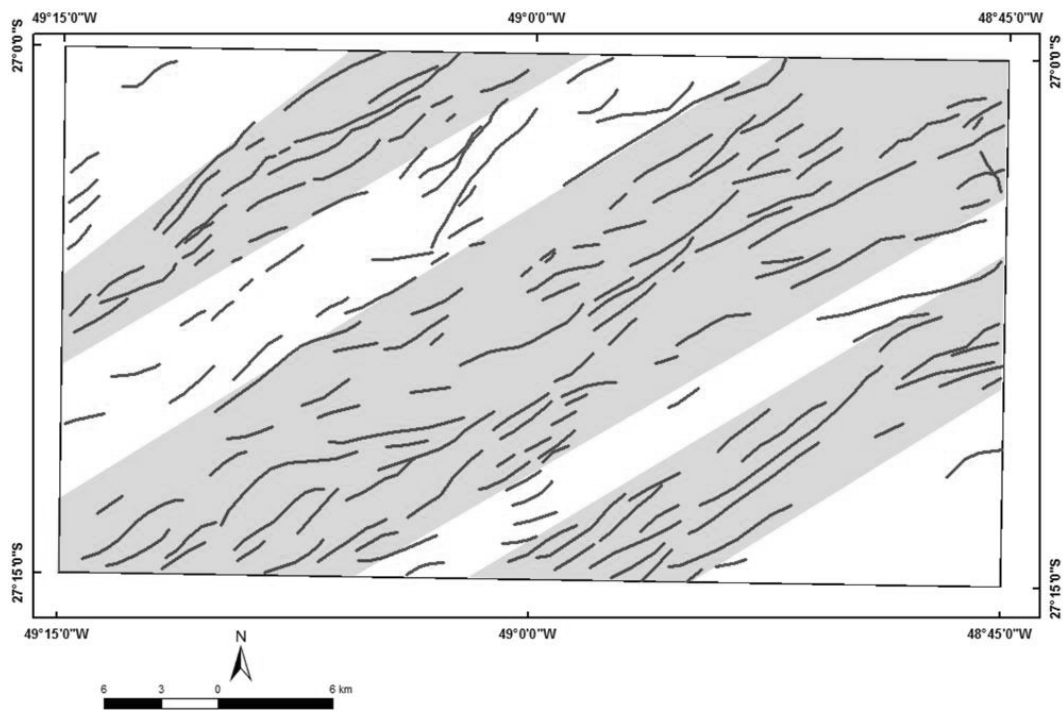


NE structures are distributed over all the studied area in N30E to N50E directions, and concentrates in three major zones: in northwestern portion, center and southeast. The first group of SW-NE lineaments, located in northwestern portion are associated to Itajaí-Perimbó Shear Zone, as well as Ribeirão da Prata Complex rocks. IPSZ is characterized by exhibiting ductile to ductile-ruptile features, like mylonites, ultramylonites and phyllonites, but also ruptile character (Schroeder, 2006). Its geometry and cinematics are complex, defined as a braided set of thrust and transcurrent associated faults (Biondi *et al.* 1992; Schroeder, 2006). Magnetic lineaments show the same pattern, a set of braided structures following Ribeirão da Prata Complex and IPSZ. The second group of SW-NE lineaments, located in the center of the area crosses it all from

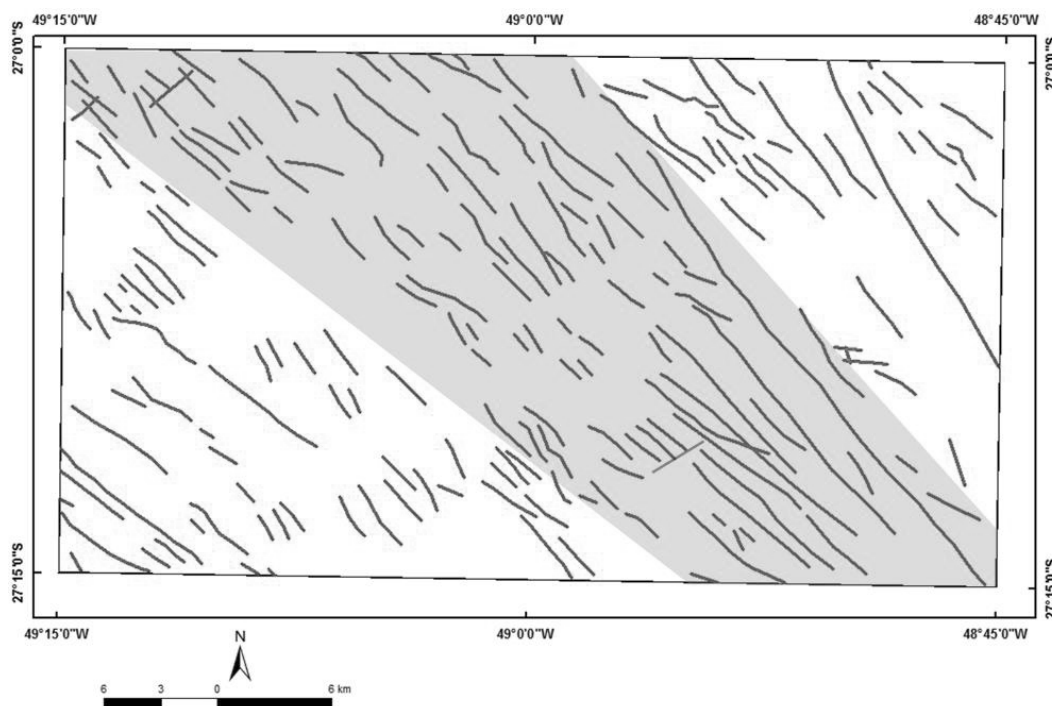
southwest to northeast, and are related to a series of thrust fault shear zones in BMC and probably to faults and joints in North Valsungana Batholith. These shear zones are Lageado Carneiro Branco (LCBSZ), Águas Cristalinas (ACSZ) and Itajaí-Mirim Lineament (IML) (Biondi *et al.* 2007). An important characteristic of this group of magnetic lineaments is that it seems to have an relation to gold mineralization, as the occurrences almost always appears close to it. The southeastern group of lineaments is associated to a series of structures (faults or joints) hosted majorly in South Valsungana Batholith. These lineaments present a strong correlation with terrain features, and may suggest the presence of a shear zone.



EW lineaments are closely related to NE structures, and less pervasive than other direction lineaments, with major concentration in the center and southeast. Its geometry tends to be sinuous, and probably related to ACSZ, as this lineaments are centered close to this structure. In center area, EW appear to be inflections in NE lineaments, and have some relation to mineralization due to proximity to occurrences.

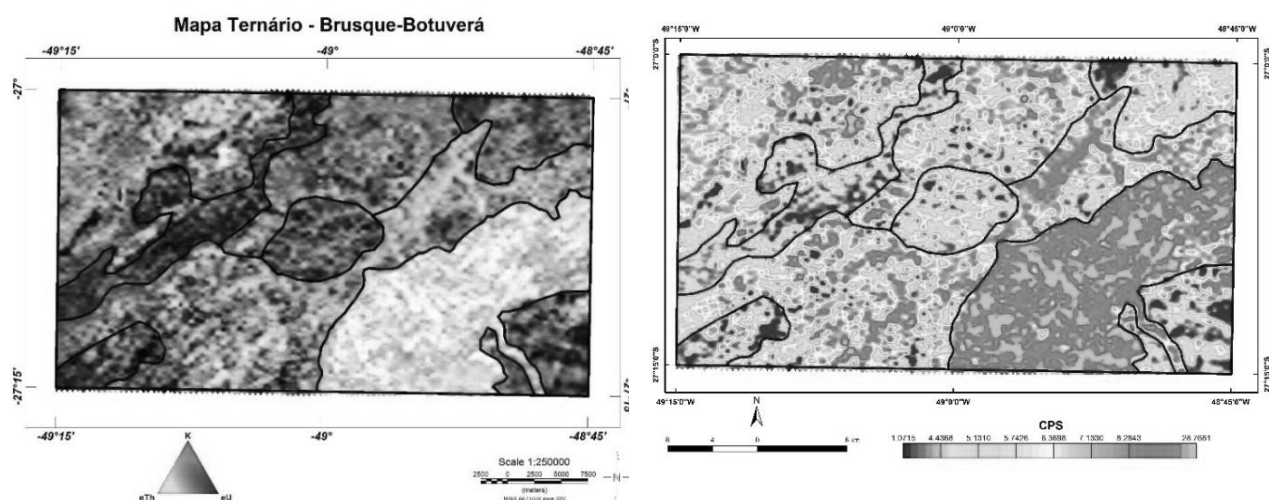


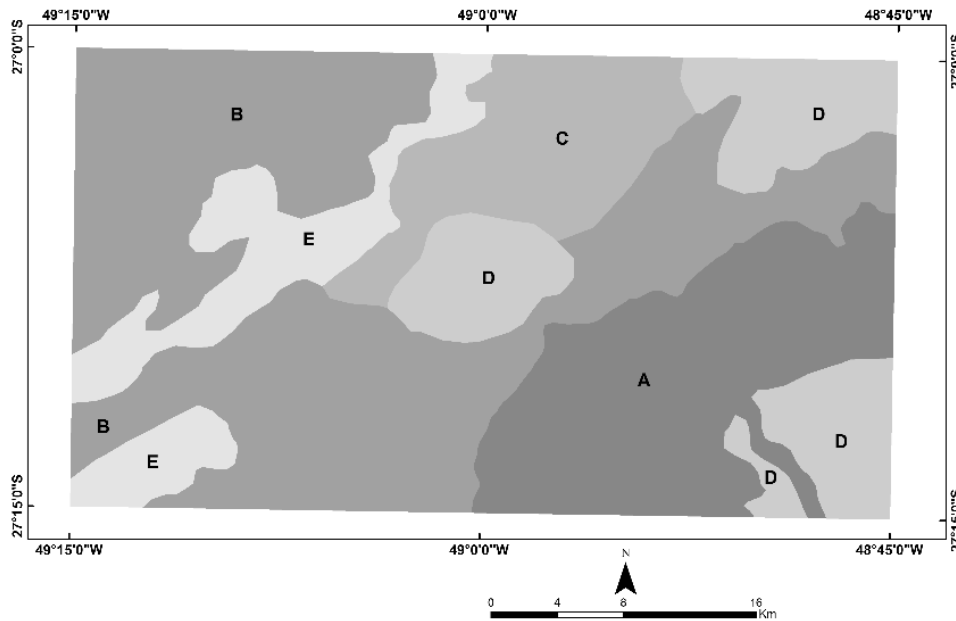
NW lineaments, unlike NE direction, are present as long and continuous alignments, not distributed so clearly in zones, but more homogeneously over the area, although it is possible to identify in the central region a major density of these lineaments, ranging directions from N30W to N50W. This features coincide with positive NW lineaments in relief, and may suggest a relation between magnetic NW lineaments and basic/mafic dykes.



6.5.2. Radiometric Data Interpretation

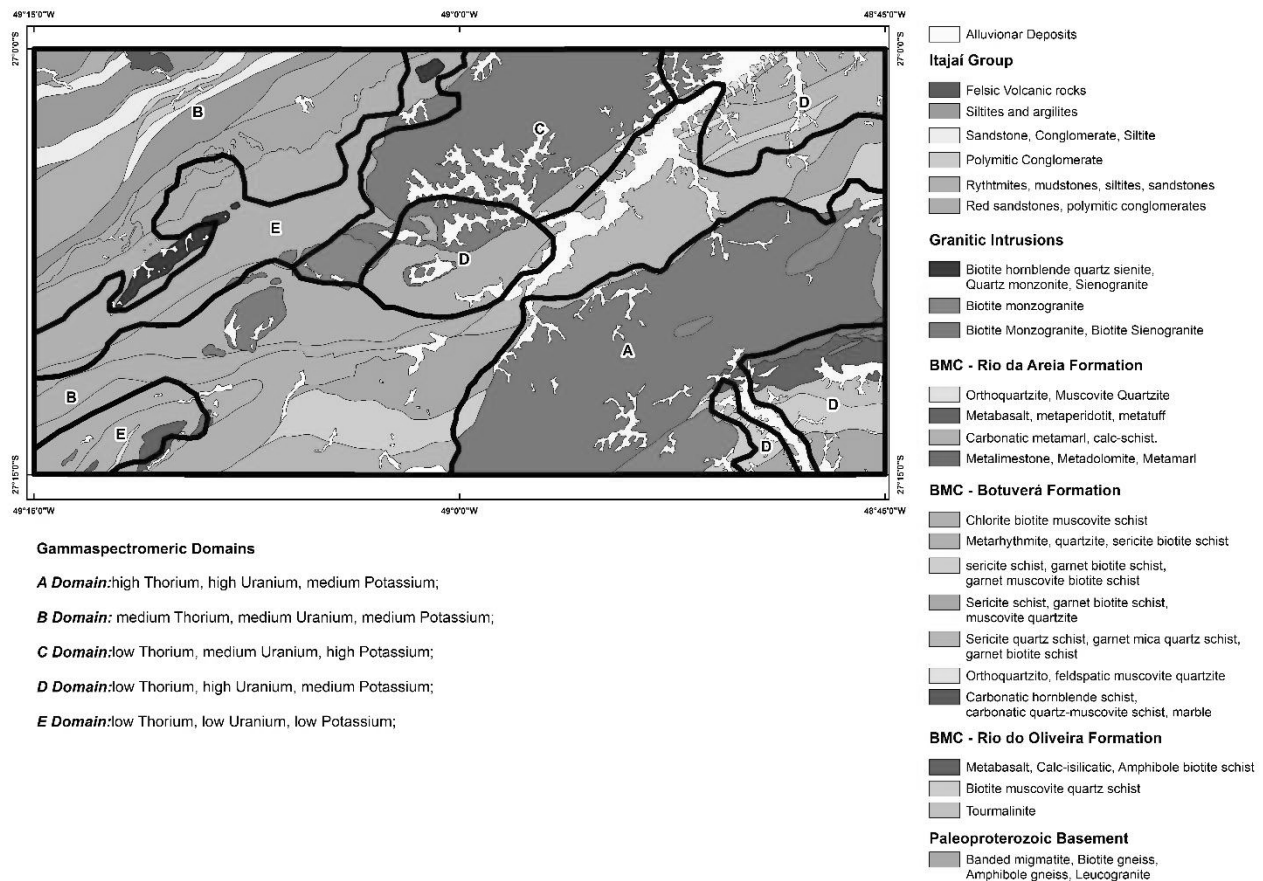
Based on total count, K, U, Th and ternary K-U-Th, it is possible to see element distribution patterns, as the enrichment of some elements and the lack of other are cause by endogenous and exogenous factors (Ulbricht *et al.*, 2009; Ribeiro *et al.*, 2013). Similar responses and element distribution areas were related and grouped into gammaspectrometric domains and than interpreted in correspondence to the superficial geology. K, U and Th were applied to separate the domains according to its distributions and concentrations (high, medium and low).





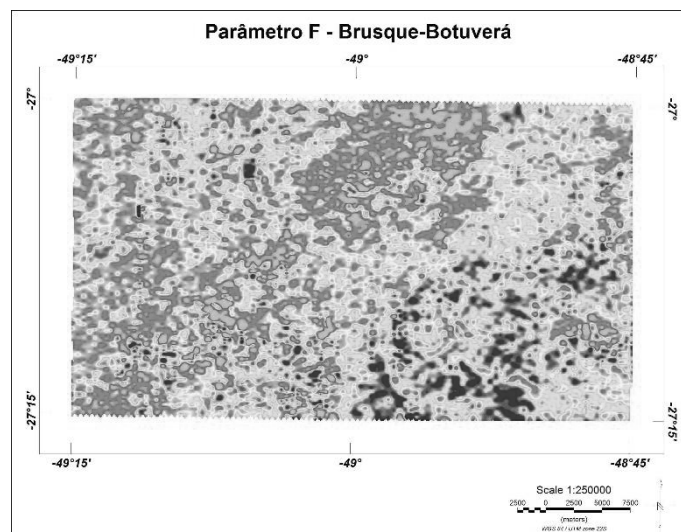
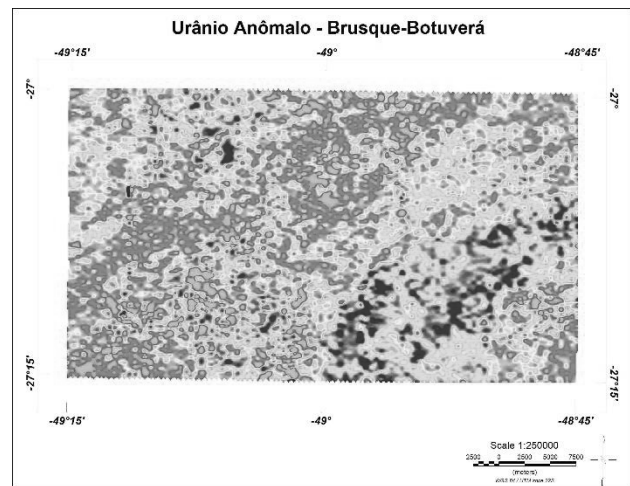
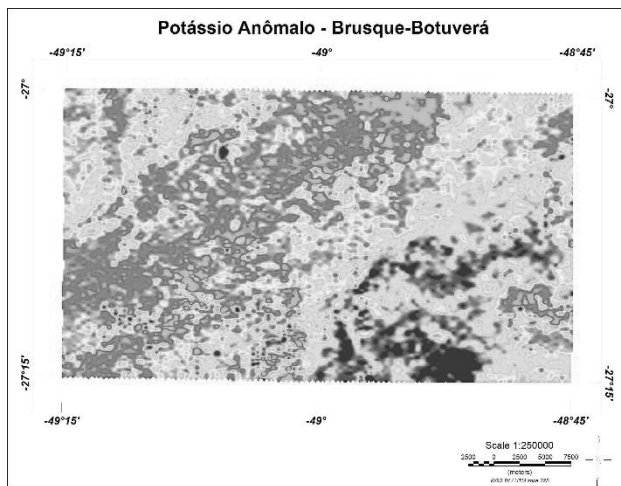
Through identification of element distribution patterns, it was possible to define five gamma-spectrometric domains. *A* domain consists in an area in southeast with high Th and U and medium K, and incides almost totally over South Valsungana Batholith and an alluvionar deposit. This domain has a strong correlation to its associated geologic units, and based on K and Th concentrations, this intrusion probably had little influence of hydrothermal processes. *B* domain exhibit medium values in Th, U and K. and have a wide distribution over research area. *B* domain is separated in two parts: one in northwest portion, related to Itajaí Group sedimentary sequences, granitic gneisses from Ribeirão da Prata Complex and Faxinal Granite. As Itajaí Group have arkosian, polymitic conglomeratic and argillaceous rocks, it is expected to present a considerable radiometric response, the same way as Faxinal Granite, compose by sienites and monzonites and Ribeirão da Prata Complex, consisted in granitic gneisses with K feldspar in its composition. Second part is over part of BMC, especially in phyllites and micaschists units, rich in phyllosilicates with high contents of potassium. *C* domain is characterized by low Th, medium U and high K, and is located in north and center portions. This domain is related to North Valsungana Batholith, that, diferently from South Batholith, shows a anomalous potassium concentration, probably due to hydrothermal processes that impressed this K enrichment signature over it. *D* domain is represented by low Th, high U and medium K, and is separated in three parts: one in the center, one in northeast and the third in southeast. The center area covers part of BMC and North Valsungana Batholith, as well as Lageado Baixo Granite. This element distribution might be associated with hydrothermal processes, considering the Th, U and K ratios. Finally, *E* domain is represented by low concentrations in the three elements, an is mostly associated to Metarhythmic unit from Botuverá Formation, which is composed by schists, phyllites,

metapsammites and quartzites, and to Rio da Areia Formation, consisted in carbonatic and amphibolitic rocks. Due to these rocks composition, in special quartz, carbonate and mafic rich units, potassium, uranium and thorium are expected to show a small concentration.

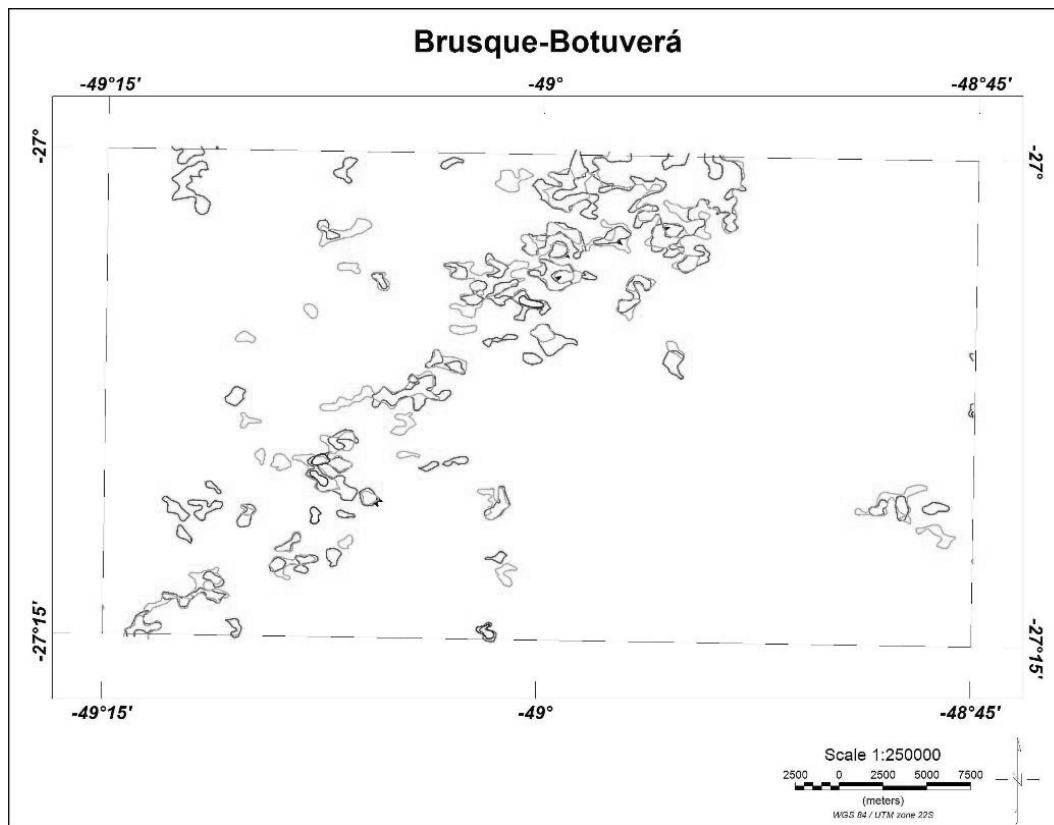


6.5.3. Hydrothermal Alteration Suggestive Parameters

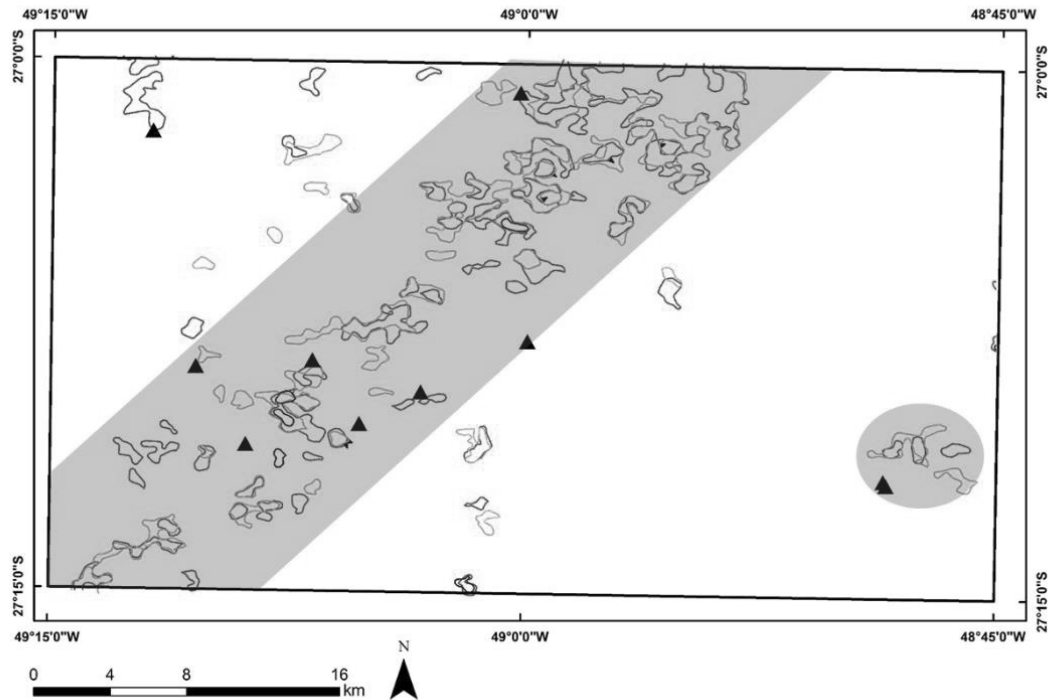
After the determination of gamma-spectrometric domains, hydrothermal alteration suggestive parameters (F Parameter, Kd and Ud) were analyzed, in order to observe distribution of anomalous potassium and, subordinately, uranium, associated to hydrothermal alteration zones that might host Au mineralization. The three maps were analyzed individually and combined, by a ternary map. Values above the average were also analyzed, based on mean plus one standard deviation ($\bar{x}+S$) maps for the three parameters, in order to identify regions with above average anomalous values of potassium and uranium, and relate it to mineralization.



F Parameter is a method based on distribution of K in relation to U/Th ratios, showing k-rich zones over differentiated areas, as U/Th evidences igneous rock's level of differentiation (Gnojek & Prichystal, 1985), and Kd (and Ud) evidences anomalous values based on Th distribution. In research area, major F parameter and Kd peaks are distributed in a main SW-NE band that cross it from southwest to north center. This high values coincides with several granitic intrusions, including North Valsungana Batholith, and is aligned with NE structures that passes through BMC. It is possible to observe low F Parameter and Kd in South Valsungana Batholith, and high values in a southeast portion close to it. This relation between high F Paramenter and Kd values supports the idea that North Valsungana Batholith and other smaller intrusions (Rio da Areia, Faxinal, Gaspar, Santo Antônio, Lageado Mirim, Lageado Alto and Lageado Baixo) went through a intense hydrothermal alteration process associated to structural development, as suggested by Biondi *et al.* (2007). Ud have a similar distribution to F Paramenter and Kd, indicating the realtion between hydrothermalism and granites and structures, but more disperse values over the area.

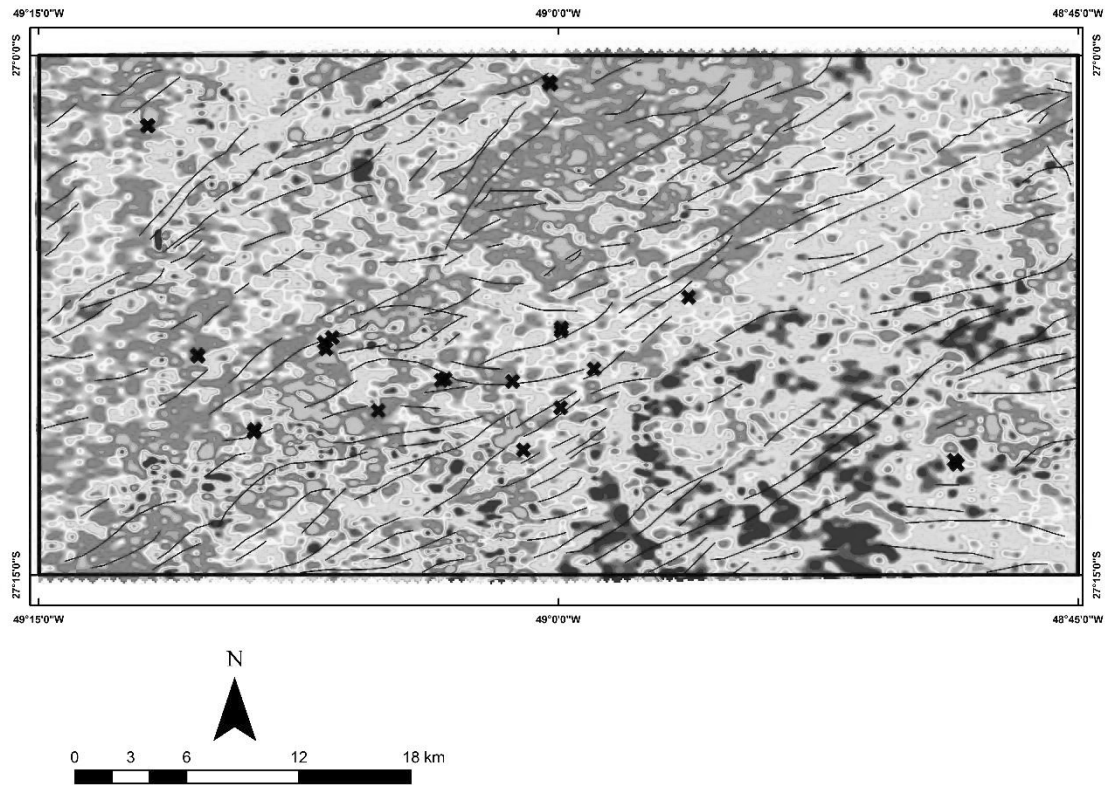


Contour maps of F Parameter, Kd and Ud were elaborated to identify values superior to the global average of the area. For that, values for the mean plus one, two and three times the standard deviation were used, but only the mean plus one ($\bar{x}+S$) standard deviation presented significant results, evidencing more clearly the favorable areas for hydrothermal alteration. Establishing a relation to mineralization, it is possible to observe that Au occurrences are almost always close to this $\bar{x}+S$ zones, contributing to the idea that the anomalies are related to alteration.

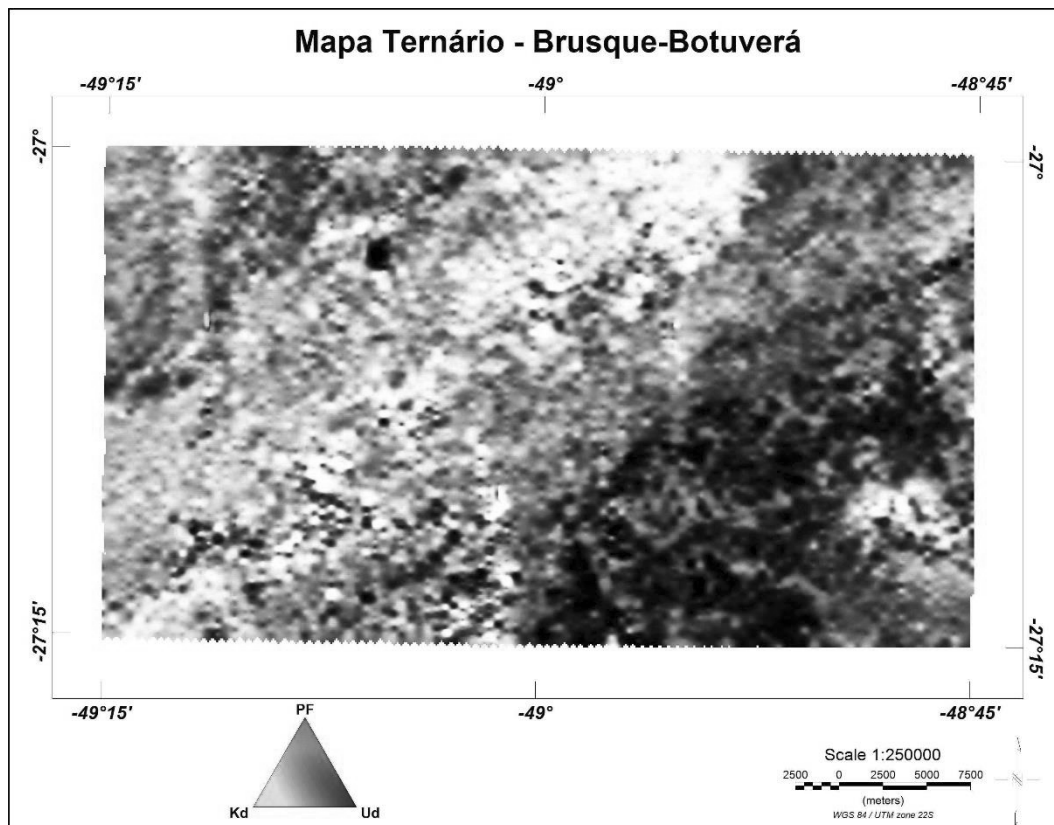


6.5.4. Magnetic and Radiometric Integration

Biondi *et al.* (2007) defined that Au deposits in Botuverá are characterized by quartz-sulfide veins resulted from hydrothermal magmatic processes, with later remobilization caused by faulting and shear zone reactivation. In this model, there was no generation of new fluids and mineralization due to deformation, only mobilization and modifications in the deposit's geometry, preserving the characteristic magmatic alteration zones where hydrothermal processes has passed through. Considering this scenario, by combining gammaspectrometry in the identification of hydrothermal zones with magnetometry to structural characterization, it is possible to delineate favorable zones for Au mineralization occurrences.

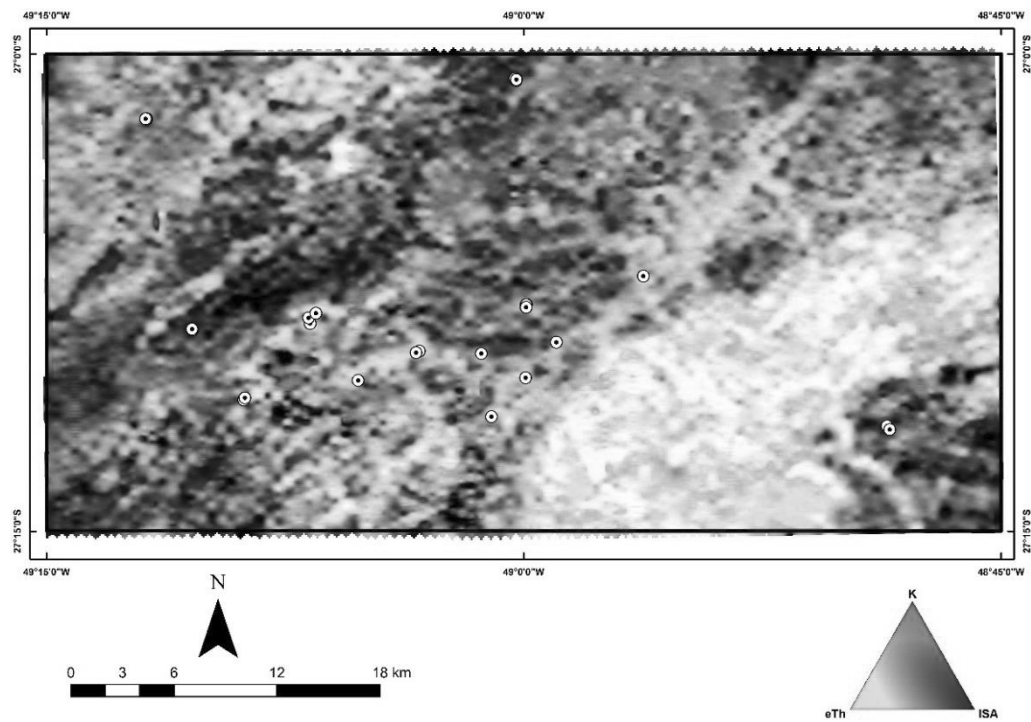


Through sobreposition of NE magnetic lineaments over F parameter, Kd and Ud, it was observed that magnetic and gamma-ray anomalies have similar distribution in research area, with several lineaments coinciding exactly over gamma peaks. When analyzing the distribution of gold occurrences, it is observed that these are frequently located close or over regions where both anomalies coincides. Irvine & Smith (1990) and Shives *et al.* (2001) state that the combination of gammaspectrometry and magnetometry is fundamental in the identification of regions favorable for the existence of mineralizations, corroborating the relationship of geophysical anomalies with mineralizing processes.



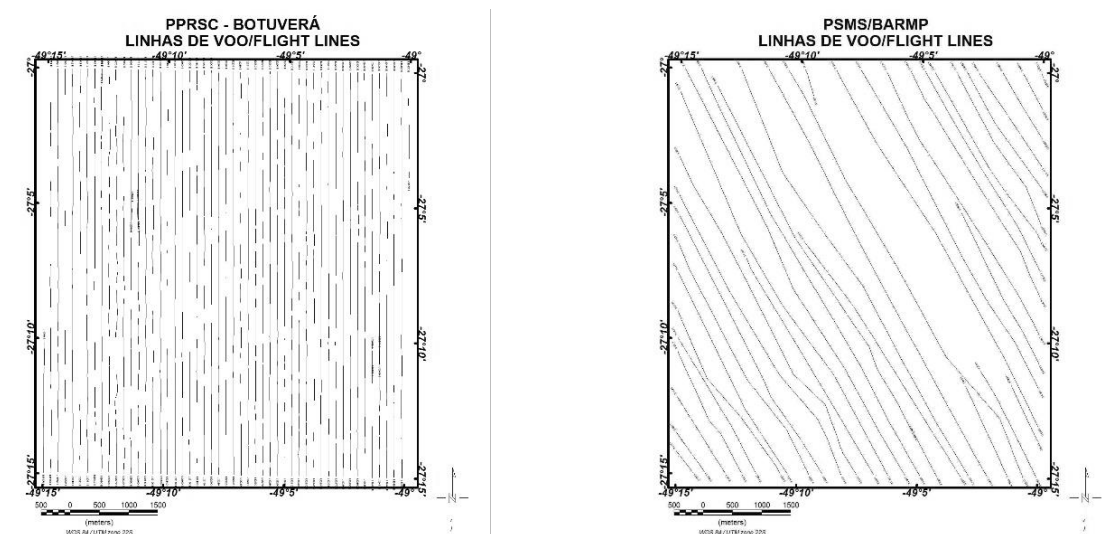
Irvine and Smith (1990) recommend the use of ternary maps in geophysical research work. Among these maps, the authors consider a "hybrid" ternary map integrating thorium (potassium) (red) and magnetic field (blue) as instructive in the research. This ternary magnetic-spectrometric map was elaborated using Thorium as *green*, Potassium as *red* and TDR as *blue*. TDR was used instead of Local Magnetic Anomalies because it locates the peaks over the center of structures independently of source depth.

The ternary magnetic/radiometric map shows important factors in combination: the thorium, a low geochemical mobility element, tends to spot the original source of radiometric signal, filtering effects produced by exogenous agents; potassium highlights areas where hydrothermal processes may have occurred and TDR exhibits structures such as faults and shear zones, as well as the edge of susceptible bodies. By projecting Au mineralizations in ternary map, it is possible to observe that areas Th and K enrichment (yellow color in the ternary map) associated to high K zones and TDR peaks (pink in the ternary map) often present occurrences close to it. This can be an important guide in the definition of Au mineralization zones.



6.5.5. SMSP and PRSC Comparison

Fornazzari & Ferreira (2003) used gamma-spectrometric data from the Serra do Mar Sul Project (SMSP) with geological and prospective data in research area in order to define potential targets for the occurrence of Au mineralizations, observing the radiometric responses of known mineralizations, such as Morro do Carneiro Branco, Braço Cristalino and Tigrano over flight lines. Based on the radiometric responses, the authors defined three potential targets for the occurrence of gold. For interpretation, it was used a 750 x 750 meters cell sized grid due to the irregularity in the spacing of the flight lines.



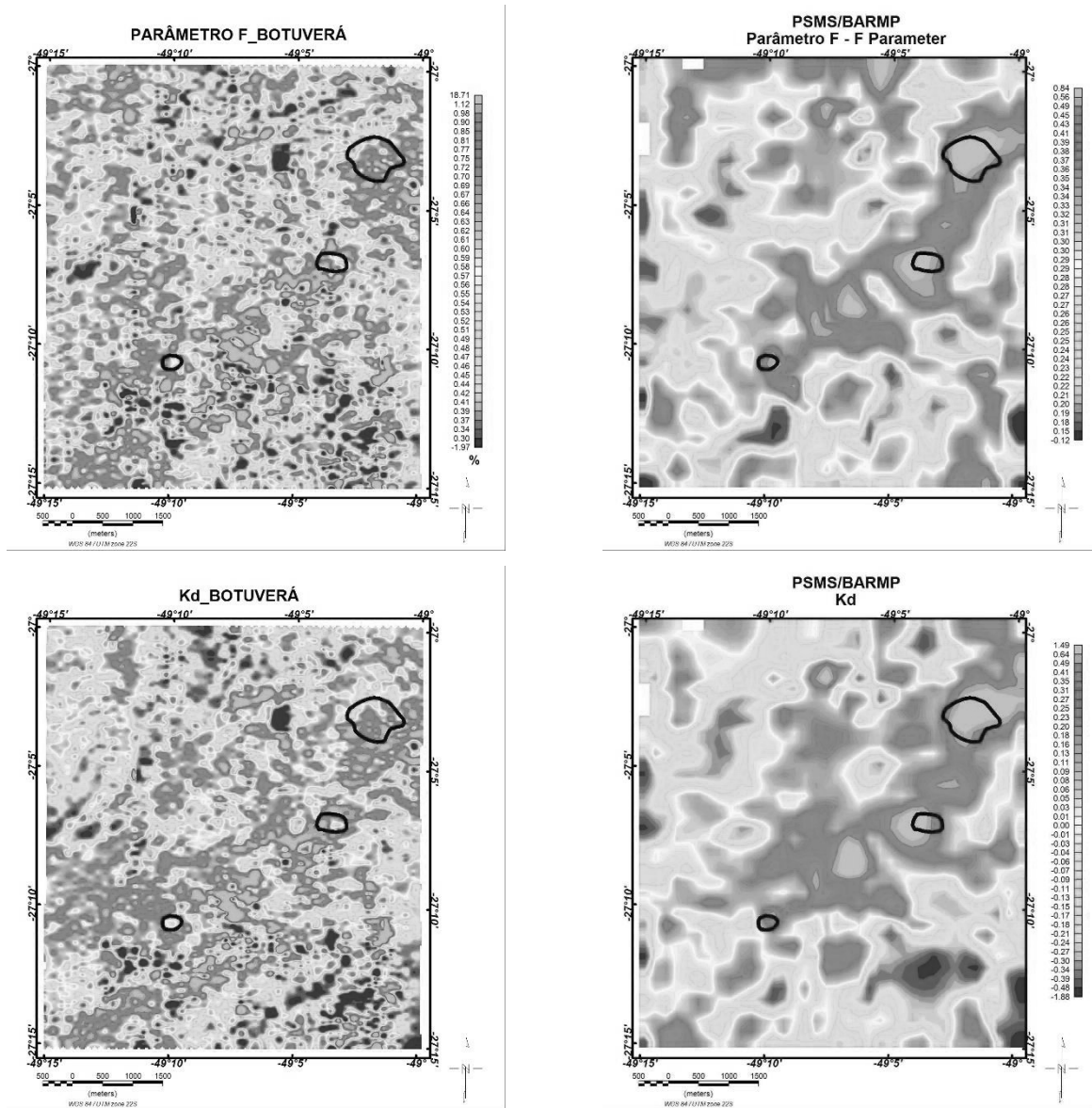
This research used magnetic and radiometric data from Paraná – Santa Catarina Project (PRSCP), as well as geologic, EDM (Elevation Digital Model) and exploratory data in the identification of favorable areas for Au occurrences. Comparing SMSP and PRSCP, the first one presents wider flight line spacing: 750 to 1.250 meters against 500 m of the last one, and a higher flight altitude (105 to 165 m in SMSP and 100 m in PRSCP). It was considered only Botuverá Sheet area in this comparison, in order to analyze the data in the same way as Fornazzari & Ferreira (2003) did to reach exploratory targets with same data distribution. Total Count (TC), K, U, Th, F Parameter, Kd, Ud and Ternary K-U-Th were studied in this comparison.

Analyzing both projects, it is possible to note that PRSCP maps are much more detailed than SMSP maps, exhibiting better defined anomaly peaks. Despite the maps definition, the radiometric data distribution over research area is similar, with elements patterns matching in zones. Among these elements, U shows biggest difference, while K and Th, except the lower resolution, are disseminated in NE bands, just like magnetic lineaments in PRSCP with same direction. By investigation of statistic information, it is noticed that SMSP have bigger minimum values, smaller maximum values and generally lower average and standard deviation than PRSCP, indicating that the last project have a better and more homogeneous data acquisition and distribution, principally caused by the number of collected points (9522 from SMSP against 17800 from PRSCP)

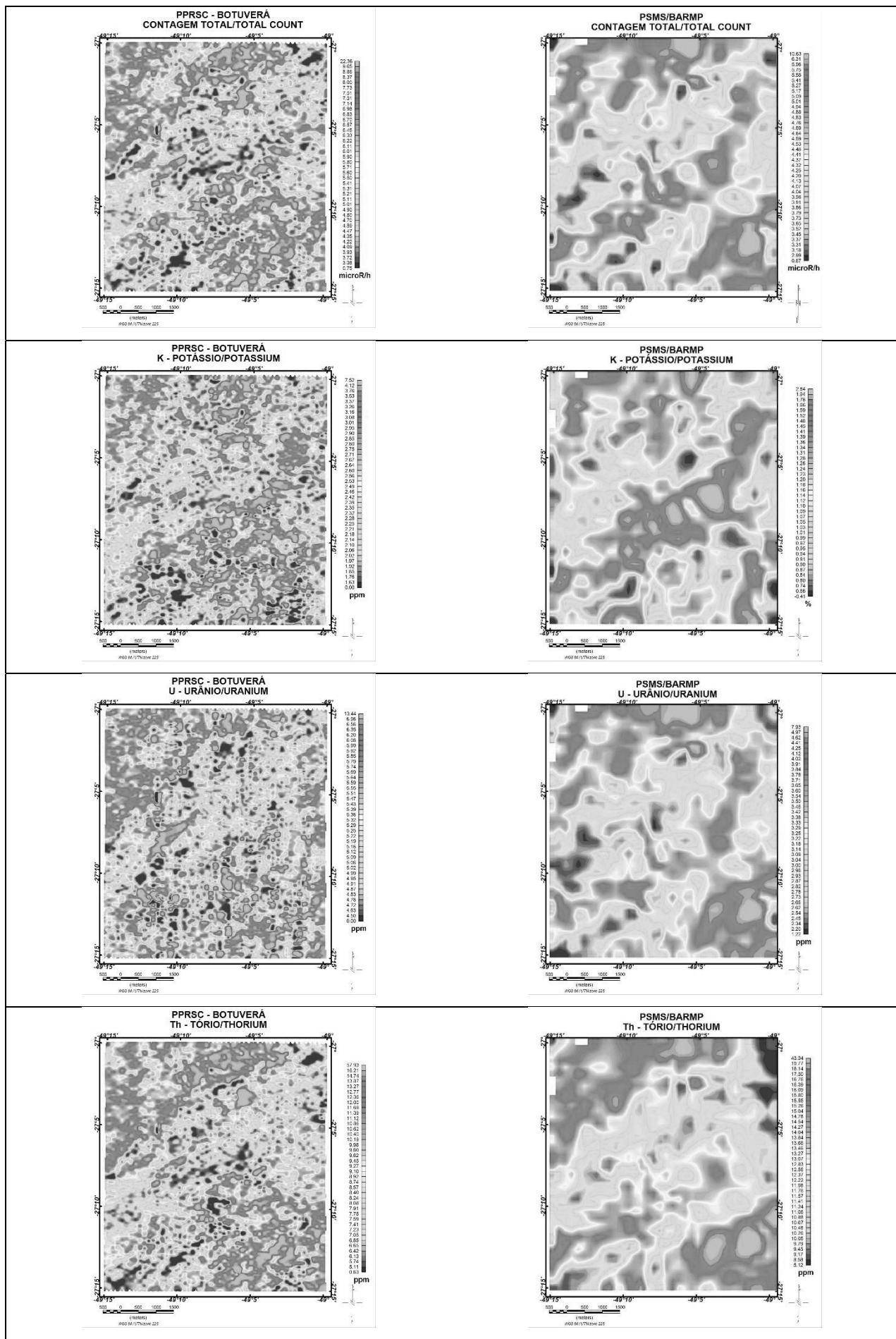
PRSCP	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
TC	0,74	22,36	5,94	1,64
K	0,0	7,5	2,59	0,64
U	0,0	13,43	5,44	0,64
Th	0,63	57,92	9,60	3,07
SMSP	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
TC	0,67	10,63	4,44	0,90
K	0,0	2,83	1,18	0,33
U	1,21	7,93	3,34	0,72
Th	5,12	43,34	13,21	3,08

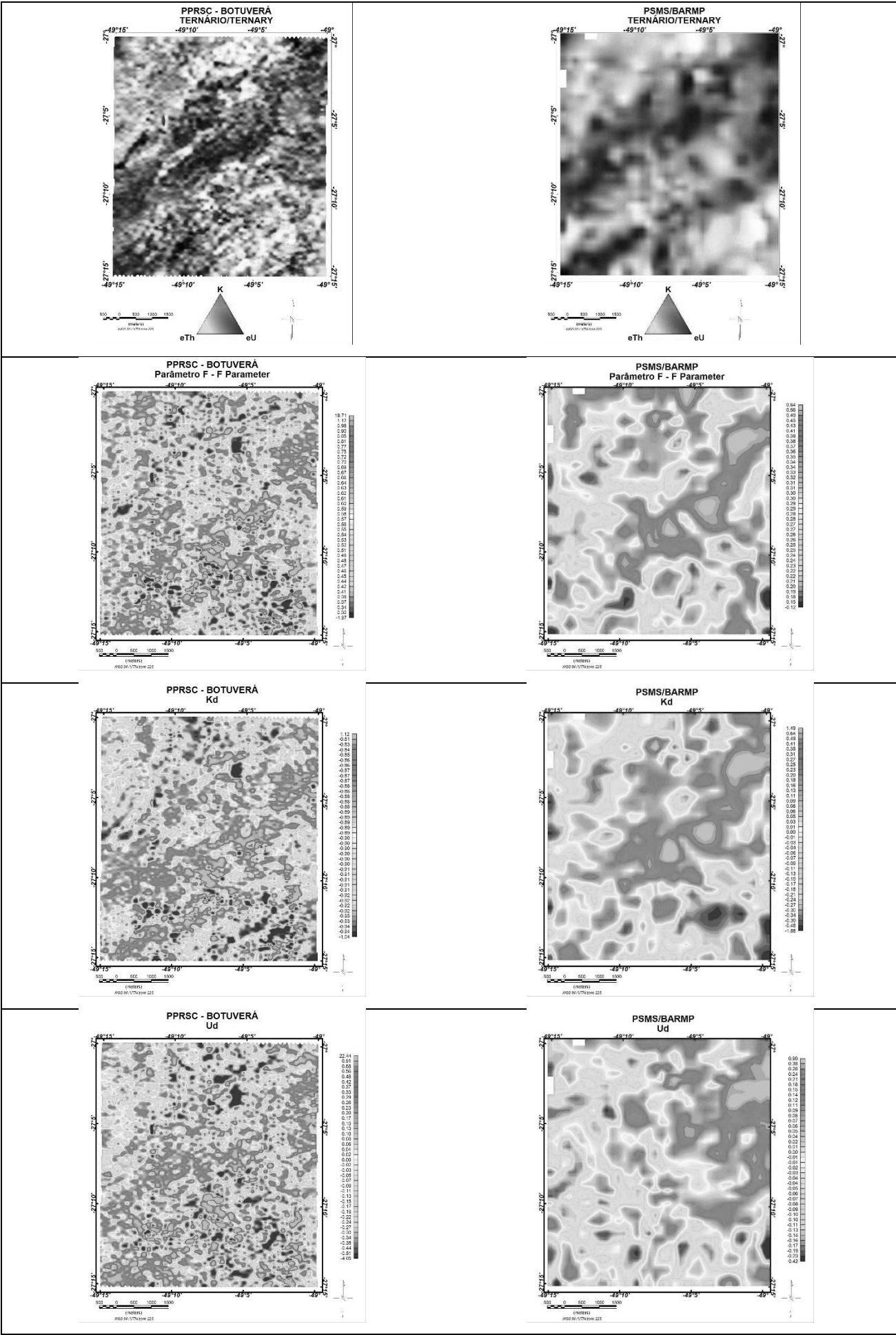
Hydrothermal alteration suggestive parameters comparison also showed that PRSCP delineate better anomalies in the three maps (F Parameter, Kd and Ud), however both SMSP and PRSCP have a similar distribution in a major zone crossing from SW to NE. Despite the similar data distribution, SMSP have three important peaks in F Parameter and Kd, and it is where Fornazzari & Ferrerira defined its potential Au mineralization targets. However, by sobrepozing these potential areas over PRSCP, it is possible to observe that exists other areas with more significative values. Ud, in same way as U, does not have a so evident correlation in both projects,

exhibiting a difference in southwestern portion in the projects: while PRSCP have high values, SMSP shows medium values.



By establishing a relation to geological setting, is it possible to notice that SMSP radiometric data is not as clear as PRSC data, however, some units have interesting responses, especially Itajaí Group, that exhibit higher concentration of radioactive elements. The SW-NE central zone is not exactly representing a group of rocks with similar composition, but part of BMC and granitic intrusions that probably passed through hydrothermal processes that increased this region in K and U.





6.5.6. Favorable Zones Definition

The definition of zones favorable to hydrothermal filonous Au occurrences was made through knowledge driven method, using Boolean logic technics (Index Overlay method). According to Nóbrega (2001), knowledge driven method consists in data analysis by a specialist, that is, through previous knowledge of mineralizing system, in a way that data examination is executed according to pre-established metallogenetic model. By knowing the model, favorable features to hydrothermal vein-hosted Au are established, and then analyzed through Boolean logic.

Boolean method technic consists in mathematic and logic operations, such as NO, AND and OR over binary data. Although they are simple operations and information, it can exhibit interesting results for mineral research (Nóbrega, 2001). Bonham-Carter (1994) *apud* Nobrega (2001) applies the Index Overlay method, which consists in Au mineralization related variables sobreposition, and assigning weights to them, according to their relevance.

Favorable zones were defined through sobreposition of geologic, structural, magnetic and radiometric data to known occurrences, and then applied weights to these features, according to its response to mineralization. In relation to geology, only granite rocks and contact metamorphism zones were considered, plus an influence area of 500 m and weight 1; For the structures, were considered faults and shear zones plus of 500 m and weight 3; To NE magnetic lineaments were also considered 500m and weight 3; And finally, for Parameter F. and Kd, it was applied values higher than the mean plus one standard deviation ($\bar{x} + S$) and influence of 500m, with weight 2. Considering this set, the formula for favorable zones definition is made this way:

$$FZ = [geo] + [3 \times (struct)] + [3 \times (mag.lin)] + [2 \times (FP)] + [2 \times (Kd)]$$

Where:

FZ: Favorable Zones

geo: Lithotype

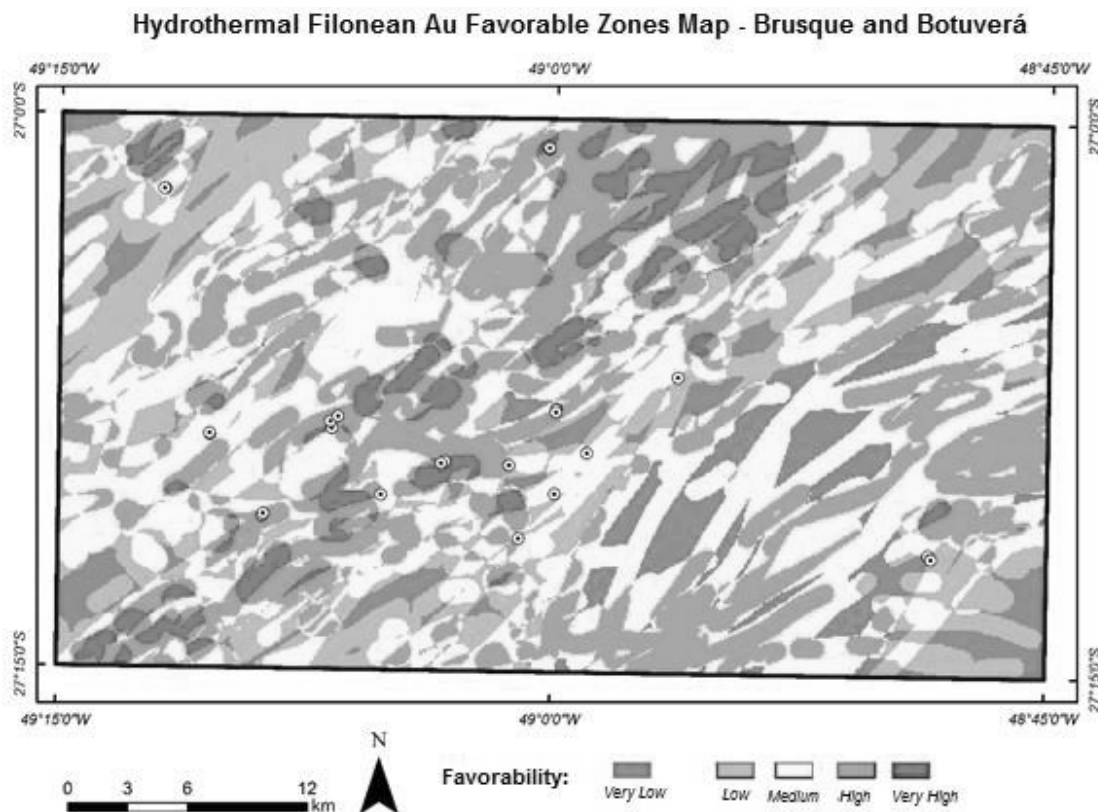
struct: Structures

lin. mag: Magnetic Lineaments

FP: F Parameter

Kd: Anomalous Potassium

From this equation, values were distributed in five classes according to standard deviation values: **Very Low** (0.00 to 1.34); **Low** (1.34 to 3.85); **Mean** (3.85 to 6.58); **High** (6.58 to 9.30) and **Very High** (9.30 to 11). Through the favorability map, a central NE band is observed, where large areas of Very High, High and Medium values occur. Other important regions that present High to Very high values are a small portion to NW, located in Itajaí Group, one next to the IPSZ and in a small area close to the contact of the Southern Valsungana granite and the MCB. Through the correlation of mineralizations and the favorability map, it is possible to notice that these are almost always located in areas with Very High to Medium values, and when not, are very close to these areas, showing a good potential of favorable zones map to exhibit areas with unknown Au mineralization.



6.6. CONCLUSION

Through PRSCP geophysical data analysis and its comparison to SMSP data reprocessed by BARMP (1997), it was possible to observe a considerable gain in quality, resolution and area of survey, and this project can contribute more effectively in the delimitation of the geophysical frame of pre-Cambrian of Paraná and Santa Catarina.

The effectiveness of aerogeophysical methods (magnetometry and gamma spectrometry) was also observed in the definition of new targets for Au mineralizations, with considerable gains in relation to previous works. The gamma spectrometry showed good correlation with the geological context, clearly

bounding the Valsungana, Nova Trento and São João Batista granitic suites, Ribeirão da Prata gneissic rocks and sedimentary sequences of the Itajaí Group. In the Brusque Metamorphic Complex, it was possible to distinguish the response of Rio de Areia Formation, thus proving to be an important tool in geological mapping. In the same way, magnetometry exhibits strong responses to structures (faults, fractures, dikes), especially to the IPSZ and to others that cross the BMC, being an effective method for defining structural framework.

By integrating geophysical and geological data, it was possible to notice that the central NE portion of the area presents the highest concentration of favorability zones for the occurrence of hydrothermal filonite mineralization, as well as part of the Itajaí Group and of the contact between the Valsungana Sul granite and the CMB. In relation to previous works, new targets were established, presenting new possibilities in the mineral research in the eastern portion of Santa Catarina.

Observing magnetic and radiometric responses close to known mineralizations, it was noticed that these present high values in both methods, but the occurrences seem to have more relation with the magnetic lineaments. As defined by Biondi et al. (2007), the hydrothermal Au deposits of Botuverá were formed in magmatic system, with subsequent modification of the geometry by the activation of structures, justifying these responses close to the mineralizations.

6.7. ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to wish a special thank the CPRM (Geological Survey of Brazil), that has given and allowed the publication of airborne geophysical data of Paraná – Santa Catarina Project, and to the Universidade Federal do Paraná for the institutional support.

7. REFERÊNCIAS

ABREU, V. Memórias Sobre a Exploração Mineral nas Comunidades de Ribeirão do Ouro e Lageado Central (Botuverá - SC - Zona de Amortecimento do Parque Nacional Serra do Itajaí): Uma História Ambiental Baseada no Ouro e Cal. Anais do XIV Encontro Estadual de História - Tempo, memórias e expectativas, 19 a 22 de agosto de 2012, UDESC, Florianópolis, SC, 2012

BARMP. *Brazil Airborne Radiometric Mapping Project. Technical Report and Survey Atlas. A collaboration between Geological Survey of Canada (GSC) and Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)*. 20 p, 1997

BASEI, M. A. S.; DRUKAS, C. O. NUTMAN, A. P.; WEMMER, K. DUNYI, L.; SANTOS, P. R.; PASSARELLI, C. R.; CAMPOS NETO, M. C.; SIGA JR. O.; OSAKO, L. *The Itajaí foreland basin: a tectono-sedimentary record of the Ediacaran period, southern Brazil. International Journal of Earth Sciences - Geologische Rundschau*, v. 100, n. 2-3, p. 543-569, 2011.

BASEI, M. A. S.; CAMPOS NETO, M. C.; CASTRO, N. A.; NUTMAN, A. P.; WEMMER, K.; YAMAMOTO, M. T.; HUECK, M.; OSAKO, L.; SIGA, O.; PASSARELLI, C. R. *Tectonic Evolution of the Brusque Group, Dom Feliciano belt, Santa Catarina, Southernmost Brazil. Journal of South American Earth Science*, v. 32, p. 324-350, 2011.

BASEI, M. A. S.; NEVES, B. B. B.; SIGA JUNIOR, O.; BABINSKI, M.; PIMENTEL, M. M.; TASSINARI, C. C. G.; HOLLANDA, M. H. B.; NUTMAN, A.; CORDANI, U. G. *Contribution of SHRIMP U-Pb zircon geochronology to unravelling the evolution of Brazilian Neoproterozoic fold belts. Precambrian Research*, v. 183, p. 112-144, 2010.

BASEI, M. A. S. Geologia e modelagem geotectônica dos terrenos pré-cambrianos das regiões sul-oriental brasileira e uruguaia: possíveis correlações com províncias similares do sudoeste africano. 124 p. Dissertação (Livre-docência) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.

BASEI, M. A. S. Cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina. 201 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1985.

BIONDI, J. C.; FRANKE, N. D.; CARVALHO, P. R. S. DE; VILLANOVA, S. N. Geologia do depósito de Au Cavalo Branco (Botuverá - SC). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, p. 445-463, 2007.

BIONDI, J.C. Processos Mineralizadores em Bacias Tardi-Orogênicas 1. Influência das Estruturas Rígidas na Geração dos Depósitos da Minepar e do Ribeirão da Prata, Grupo Itajaí (SC). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 22(3), p 275-288, 1992

CAMPOS, R. S. Petrologia, caracterização geológica, geoquímica e geocronológica do magmatismo pré, sin e pós-colisional presente no Complexo Metamórfico Brusque nas regiões de Itapema e Botuverá, Santa Catarina, Brasil. 325 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CASTRO, L. G. Arcabouço Geofísico Estrutural da Porção Meridional do Cinturão Ribeira e Regiões Adjacentes. 135 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CASTRO, N. A.; CROSTA, A.P.; FERREIRA, F. J. F.; BASEI, M. A. S.; PASCHOLATI, M. E. Quadro geológico regional da porção central do embasamento pré-ordoviciano de Santa Catarina com base em imagens LANDSAT-5/TM e aerogeofísicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 2, p. 161-172, jun. 2003.

CASTRO, N. A.; BASEI, M. A. S.; CRÓSTA, A. P. *The W (Sn-Mo) Specialized Catinga Suite and Other Granitoids of the Brusque Group, Neoproterozoic of the State of Santa Catarina, southern Brazil*. *Revista Brasileira de Geociências*; v. 29 (1); p. 17-26; mar. 1999.

CASTRO, N.A. Contribuição ao Conhecimento Geológico – Metalogenético Associado aos Granitoides Intrusivos no Grupo Brusque (SC) com Base em Informações geológicas, Aerogamaespectrométricas e LANDSAT T/TM-5. 221 p. Dissertação de Mestrado – Univerdidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997

CONCEIÇÃO, J.C.J.; ZALÁN, P.V.; WOFF, S. Mecanismo, evolução e cronologia do rift sulatlântico. *Boletim de Geociências PETROBRAS*, Rio de Janeiro; 2 (2/4): 255-265, abr./dez. 1988.

CORDELL, L., GRAUCH, V. J. S. *Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico*. In: W. J. HINZE (Ed.). *The utility of regional gravity and magnetic anomalies maps*. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 1985, v. 1, p. 181-197.

COSTA, M. S.; NASCIMENTO, M. S. Tratos deposicionais e arquitetura estratigráfica de sucessões sedimentares da Bacia do Itajaí (Neoproterozoico), nordeste de Santa Catarina, Brasil. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 111-134, jun. 2015.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Aerogeofísico Paraná – Santa Catarina, relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos, LASA Prospecções, v. 1, 2011.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Mapa Geológico. Folha Botuverá SG.22-Z-B-IV-2. Botuverá, escala 1:50.000, 1995.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Mapa Geológico. Folha Brusque SG.22.Z.D.II.1. Botuverá, escala 1:50.000, 1995.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Aerogeofísico Serra do Mar Sul, relatório final, 1978.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. *Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding geochemical factors*. *Journal of South Australian Geology & Geophysics*, v. 17 (2), p. 187-200, 1997.

EL NABI; S.H. *Role of γ -ray spectrometry in detecting potassic alteration associated with Um Ba'anib granitic gneissand metasediments, G. Meatiq area, Central Eastern Desert, Egypt*. *Arab Journal of Geosciences* DOI 10.1007/s12517-011-0378-4. 2011.

FERREIRA, F. J. F.; FRUCHTING, A.; GUIMARÃES, G. B.; ALVES, L. S.; MARTIN, V. M. O.; ULBRICH, H. H. G. J. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. II: O exemplo do granito Joaquim Murtinho, Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná. *Revista do Instituto de Geociências – USP, São Paulo*, v.9, n. 1, p. 55-72, jan. 2009.

FERREIRA F. J. F.; SOUZA J ;BONGIOLO A.B.S; CASTRO L.G.; ROMEIRO M.A.T. 2010. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I: Aplicação a dados sintéticos. *In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, SBGf Brasília, Anais*, p. 1-6.

FERREIRA, F. J. F., SOUZA, J, BONGIOLO, A.B.S, CASTRO, L. G. 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*. 78, J33-J41

FORNAZZARI NETO, L.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá, SC. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 2, p. 197-208, 2003.

GNOJEK, I., PRICHYSTAL, A. *A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia)*. *Geoexploration*, v. 23, n. 4, p. 491-502, 1985.

HUECK, M.; BASEI, M. A. S.; CASTRO, N. A. *Origin and evolution of the granitic intrusions in the Brusque Group of the Dom Feliciano Belt, south Brazil: petrostructural analysis and whole-rock/isotope geochemistry*. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 69, p. 131-151, 2016.

IRVINE, R. J.; SMITH, M. J. *Geophysical exploration for epithermal gold deposits*. *Journal of Geochemical Exploration, Amsterdam*, v. 36, p. 375-412, 1990.

ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data*. *Australian Society of Exploration Geophysists*.2013.

MILLER H.G. & SINGH V. 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*. 32: 213-217.

MINTY, B. R. S. *Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry*. *Journal of South Australian Geology & Geophysics*, v. 17 (2), p. 39-50, 1997.

NABIGHIAN, M. N. *The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation*. *Geophysics*, v. 37, p. 507-517, 1972.

NÓBREGA, R. P. *Análise espacial 'knowledge-driven' e 'data-driven': o uso das lógicas booleana, fuzzy e redes neurais para geração de mapas favorabilidade mineral na região centro-leste da Bahia*. *Dissertação (Mestrado em Geologia)*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

- OSTROVSKIY, E. Ya. *Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its using in aerogamma spectrometric prospecting*. *International Geology Review*, v. 17 (4), p. 461-468, 1973.
- PHILLIP, R. P.; CAMPOS, R. S. Granitos peraluminosos intrusivos no Complexo Metamórfico Brusque: registro do magmatismo relacionado à colisão neoproterozoica no Terreno Tijucas, Itapema, SC. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40, n. 3, p. 303-320, 2010.
- PHILLIP, R. P.; MALMANN, G.; BITENCOURT, M. F.; SOUZA, E. R.; SOUZA, M. M. A.; LIZ, J. D.; WILD, F.; ARENDT, S.; OLIVEIRA, A.; DUARTE, L.; RIVERA, C. B.; PRADO, M. Caracterização litológica e evolução metamórfica da porção leste do Complexo Metamórfico Brusque, Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências*, v.34, n.1, p. 21-41, 2004.
- PIRES, A. C. B. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, v.1, n.25, p. 61-68, mar. 1995.
- PORTNOV, A. M. Specialization of rocks toward potassium and thorium in relation to mineralization. *International Geology Review*, v. 29 (3), p. 326-344, 1987.
- RENNE, P. R.; ERNESTO, M.; PACCA, I. G.; COE, R. S.; GLEN, J. M. ; PRÉVOT, M.;PERRIN, M. The Age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. *Science*, v. 258, p. 975-979, 1992.
- RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M. S. M.; LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terrae Didatica*, v. 10, p. 29-51, 2013.
- ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, v. 57, n. 1, p. 116-125, jan. 1992.
- ROSTIROLLA, S. P.; ALKMIN, F. F.; SOARES, P. C. O Grupo Itajaí, estado de Santa Catarina, Brasil: exemplo de sedimentação em uma bacia flexural de antepaís. *Boletim de Geociências - PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v. 6, n.3/4, p. 109-122, jul./dez., 1992.
- SAUNDERS, D. F.; BRANCH, J. F.; THOMPSON, C. K. Tests of aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, v. 59, p. 411-419, 1994.
- SCHROEDER, G. S. Análise tectônica da Bacia de Itajaí. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- SHIVES, R. B. K.; CHARBONNEAU, B. W.; FORD, K. L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry - Recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, v. 65, n. 6, p. 2001-2011, 2000.

SILVA L.C. O Cinturão Metavulcanossedimentar Brusque e a evolução policíclica das faixas dobradas proterozoicas no sul do Brasil: uma revisão. Revista Brasileira de Geociências, v. 21, n.1, p. 60-73, 1991.

SILVA, L. C.; HARTMANN, L. A.; MCNAUGHTON, N. J; FLETCHER, I. Zircon U-Pb SHRIMP dating of a neoproterozoic overprint in paleoproterozoic granitic-gneiss terranes, southern Brazil. American Mineralogist, v. 85, p. 649-667, 2000.

de SOUZA, J.; FERREIRA, F. J. F. On the use of derivatives for interpreting magnetic anomalies due to dyke-like bodies: Qualitative and quantitative analysis. International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition, SEG. Istanbul. 2012.

de SOUZA, J.; FERREIRA, F. J. F. On the Use of Derivatives for Interpreting Magnetic Anomalies Due to Dyke-Like Bodies II: Application to Synthetic and Field Data. Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, SEG. Houston. 2013.

de SOUZA, J.; FERREIRA, F. J. F. The application of Signum Transform to the interpretation of magnetic anomalies due to prismatic bodies. 24th International Geophysical Conference and Exhibition. Perth. 2015

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. 1990. Applied geophysics. 2nd ed. Nova York: Cambridge University Press. 770p.

ULBRICH, H. H. G. J.; M. N. C. ULBRICH; FERREIRA, F. J. F.; GUIMARÃES, G. B.; FRUCHTING, A. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. I: Revisão da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos K, Th e U. Revista do Instituto de Geociências – USP, São Paulo, v.9, n. 1, p. 33-53, jan. 2009.

WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J.A.; BINOTTO, R.B.; IGLESIAS, C.M.F.; LAUX, J.H. Mapa Geológico do estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.

ZHANG, Y.; XIONG, S.; TIANYOU C. Application of airborne gamma-ray spectrometry to geoscience in China. Department of Applied Geophysics, the China University of Geosciences, Xue Yuan Lu, v. 49, n. 1-2, mar. 1997.